



**ITS**

Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

## STUDI KESTABILAN SISTEM KELISTRIKAN KALIMANTAN DAN JAWA 500 kV AC/DC MENGUNAKAN ANALISIS MODAL

Heryanto Hartra Mamana Meliala  
NRP 07111440000089

Dosen Pembimbing  
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.  
Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2018



TUGAS AKHIR - TE 141599

**STUDI KESTABILAN SISTEM KELISTRIKAN  
KALIMANTAN DAN JAWA 500 kV AC/DC  
MENGUNAKAN ANALISIS MODAL**

Heryanto Hartra Mamana Meliala  
NRP 07111440000089

Dosen Pembimbing  
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.  
Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2018



**ITS**

Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

## STABILITY STUDY OF 500 KV AC/DC KALIMANTAN- JAVA ELECTRICAL SYSTEM USING *MODAL ANALYSIS*

Heryanto Hartra Mamana Meliala  
NRP 07111440000089

Supervisors

Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.  
Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING  
Faculty of Electrical Technology  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2018



**STUDI KESTABILAN SISTEM KELISTRIKAN  
KALIMANTAN DAN JAWA 500 kV AC/DC  
MENGUNAKAN ANALISIS MODAL**

**TUGAS AKHIR**

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada  
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga  
Departemen Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Menyetujui :**

**Dosen Pembimbing I**



**Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.**  
**NIP. 197309271998031004**

**Dosen Pembimbing II**



**Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT.**  
**NIP. 196308171990031001**





## **PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR**

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tugas akhir saya dengan judul “**STUDI KESTABILAN SISTEM KELISTRIKAN KALIMANTAN DAN JAWA 500 kV AC/DC MENGGUNAKAN ANALISIS MODAL**” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juni 2018

Heryanto Hartra Mamana M.  
07111440000089

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



# STUDI KESTABILAN SISTEM KELISTRIKAN KALIMANTAN DAN JAWA 500 kV AC/DC MENGUNAKAN ANALISIS MODAL

Nama mahasiswa : Heryanto Hartra Mamana Meliala  
Dosen Pembimbing I : Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.  
Dosen Pembimbing II : Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT

## Abstrak :

Indonesia merupakan negara kepulauan dengan kebutuhan energi yang terus meningkat tiap tahunnya. Kalimantan merupakan salah satu pulau yang berada di Indonesia yang memiliki peranan penting dalam pertumbuhan ekonomi dan industri. Pada Perencanaan pengembangan sistem kelistrikan dibutuhkan analisis untuk menentukan kelayakan performa sistem. Pada penelitian ini dibahas *small signal stability* untuk sistem kelistrikan Kalimantan dengan backbone 500 kV AC yang menghubungkan Kalimantan Barat (Sei Raya, Ketapang), Kalimantan Timur (Bontang, Samarinda, Balikpapan), Kalimantan Utara (Tanjung Redeb), Kalimantan Selatan (Banjarmasin) dan Kalimantan Tengah (Sampit, Palangkaraya) dengan menggunakan *modal analysis* dari skenario sistem kelistrikan Kalimantan yang mengirimkan daya sebesar 1 GW menuju Jawa dengan jarak 500 km menggunakan sistem transmisi HVDC Monopolar 500 kV.

*Modal Analysis* memberikan informasi tentang *eigenvalue*, *mode shape*, dan *participation factor*. Sistem dikatakan stabil jika seluruh nilai *eigenvalue* bernilai negatif, jika terdapat satu saja nilai *eigenvalue* positif sistem dikatakan tidak stabil. Pada penelitian ini didapatkan seluruh nilai *eigenvalue* bernilai negatif. Pada tahun 2029 didapatkan nilai *eigenvalue* yang kritis dengan nilai  $-0,08468 \pm j3,97306$  dan *damping ratio* sebesar 2,131% dengan mode osilasi *inter-area* yang meliputi ketiga area yang ada di Kalimantan. Dengan nilai *eigenvalue* yang diperoleh tiap tahunnya dari tahun 2023 sampai tahun 2050 menunjukkan nilai *eigenvalue* stabil dan menyatakan sistem kelistrikan Kalimantan layak dari sisi *small-signal stability*.

**Kata kunci:**(*eigenvalue, modal analysis, small-signal stability*)

4

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **STABILITY STUDY OF 500 KV AC/DC KALIMANTAN AND JAVA ELECTRICAL SYSTEM USING MODAL ANALYSIS**

Student Name : Heryanto Hartra Mamana Meliala  
Supervisor I : Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.  
Supervisor II : Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT

## **Abstract:**

*Indonesia is an archipelago country with an ever increasing energy demand every year. Kalimantan is one of the islands located in Indonesia that has an important role in economic and industrial growth. In Planning the development of electrical systems required analysis to determine the feasibility of system performance. In this study we discussed the small signal stability for the Kalimantan electricity system with the 500 kV AC backbone connecting West Kalimantan (Sei Raya, Ketapang), East Kalimantan (Bontang, Samarinda, Balikpapan), North Borneo (Tanjung Redeb), South Kalimantan (Banjarmasin) and Central Kalimantan (Sampit, Palangkaraya) using modal analysis from a scenario of Kalimantan's electricity system that sends a power of 1 GW to Java with a distance of 500 km using a 500 kV monopolar HVDC transmission system.*

*Modal Analysis provides information on eigenvalue, shape mode, and participation factor. The system is said to be stable if all eigenvalue values are negative, if there is only one positive eigenvalue value of the system is said to be unstable. In this study obtained all eigenvalue value is negative. In the year 2029 obtained a critical eigenvalue value with the value of  $-0.08468 \pm j3,97306$  and damping ratio of 2.131% with the mode of inter-area oscillation covering the three areas in Kalimantan. The eigenvalue value obtained annually from 2023 to 2050 shows a stable eigenvalue value and states that Kalimantan's electricity system is feasible from the small-signal stability side.*

**Key Word:**(eigenvalue,modal analysis,small-signal stability)

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yesus Kristus atas segala Kasih, Karunia, dan Petunjuk yang telah dilimpahkan-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir dengan judul **“STUDI KESTABILAN SISTEM KELISTRIKAN KALIMANTAN DAN JAWA 500 kV AC/DC MENGGUNAKAN ANALISIS MODAL”**.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya penyusunan tugas akhir ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Tuhan Yesus Kristus atas kasih, karunia serta penyertaan-Nya yang luar biasa kepada penulis sehingga menguatkan dan memungkinkan penulis dalam penyusunan tugas akhir ini.
2. Herlina br Bangun selaku ibu dari penulis yang selalu memberikan kasih, perhatian serta dukungan kepada penulis baik dukungan finansial maupun dukungan moral serta motivasi kepada penulis selama masa kuliah sampai penyusunan tugas akhir ini, sehingga penulis terus semangat dalam menyelesaikan penyusunan tugas akhir ini. Semoga ibu dari penulis selalu diberikan kesehatan dan umur yang panjang.
3. (Alm) Mohtra Sembiring selaku ayah dari penulis yang selalu mendukung dan memotivasi penulis. Semoga apa yang di cita-citakan oleh ayah dari penulis dapat penulis lakukan dengan baik.
4. Enge dan Suranta selaku kakak dari penulis yang selalu mendukung dan memotivasi serta memberikan pengalaman perkuliahannya kepada penulis.
5. Bapak Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng. dan Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan dan perhatiannya selama proses penyelesaian tugas akhir ini.
6. Seluruh sahabat asisten Laboratium Instrumentasi, Pengukuran dan Identifikasi Sistem Tenaga yang saling berbagi ilmu dan menciptakan suasana belajar yang luar biasa.
7. Marthin dan Bonar selaku sahabat dari penulis dan selalu memberikan semangat, canda dan tawa sejak SMA hingga masa perkuliahan.

8. Teman-teman seperjuangan e54 yang telah menemani dan memberikan dukungan selama masa kuliah sampai penyusunan tugas akhir ini.

Penulis telah berusaha maksimal dalam penyusunan tugas akhir ini. Namun tetap besar harapan penulis untuk menerima saran dan kritik untuk perbaikan dan pengembangan tugas akhir ini. Semoga tugas akhir ini dapat memberikat manfaat yang luas.

Surabaya, Juni 2018

Penulis

## DAFTAR ISI

|  |      |
|--|------|
| ABSTRAK.....                                     | i    |
| KATA PENGANTAR .....                             | v    |
| DAFTAR ISI.....                                  | vii  |
| DAFTAR GAMBAR .....                              | xi   |
| DAFTAR TABEL.....                                | xiii |
| BAB 1 PENDAHULUAN .....                          | 1    |
| 1.1    Latar Belakang .....                      | 1    |
| 1.2    Perumusan Masalah .....                   | 2    |
| 1.3    Tujuan .....                              | 2    |
| 1.4    Batasan Masalah .....                     | 2    |
| 1.5    Metodologi .....                          | 2    |
| 1.6    Sistematika Penulisan.....                | 3    |
| 1.7    Relevansi.....                            | 4    |
| BAB 2 KAJIAN PUSTAKA.....                        | 5    |
| 2.1    Kestabilan Sistem Tenaga Listrik .....    | 5    |
| 2.2    Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga..... | 5    |
| 2.3    Kestabilan Sudut Rotor .....              | 6    |
| 2.4    Small Signal Stability.....               | 8    |
| 2.5    Analisis Modal .....                      | 10   |
| 2.5.1    State Space .....                       | 11   |
| 2.5.2    Titik Ekuilibrium.....                  | 12   |
| 2.5.3    Linierisasi.....                        | 12   |
| 2.5.4    Eigenvalue.....                         | 13   |
| 2.5.5    Eigenvector .....                       | 14   |
| 2.5.6    Eigenvalue dan Kestabilan .....         | 15   |
| 2.5.7    Eigenvector Kanan – Mode Shape .....    | 15   |
| 2.5.8    Participation Factor .....              | 16   |

|   |  |    |
|---|--|----|
| 2.6   | High Voltage Direct Current.....   | 17 |
| 2.6.1   | Keuntungan dan Kerugian Transmisi HVDC .....                                   | 18 |
| <b>BAB 3 PERENCANAAN SISTEM KELISTRIKAN KALIMANTAN</b> 21 |  |    |
| 3.1   | Sistem Kelistrikan Kalimantan dengan <i>Backbone</i><br>500 kV AC .....        | 21 |
| 3.1.1   | Data Sistem Kelistrikan Kalimantan Backbone<br>500 kV AC .....                 | 21 |
| 3.1.2   | Data Kelistrikan Kalimantan Barat .....  | 24 |
| 3.1.3   | Data Kelistrikan Kalimantan Selatan dan Tengah .....                           | 26 |
| 3.1.4   | Data Kelistrikan Kalimantan Timur dan Utara .....                              | 29 |
| 3.2   | Sistem Kelistrikan Kalimantan 500 kV AC dan Transmisi<br>HVDC Menuju Jawa..... | 32 |
| 3.2.1   | Sistem Transmisi HVDC Menuju Jawa .....  | 34 |
| 3.2.2   | Data Peralatan Sistem Transmisi HVDC .....                                     | 35 |
| 3.3   | Modal Analysis pada DIgSILENT Power Factory .....                              | 36 |
| <b>BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....                   |  |    |
| 4.1   | Pemodelan Sistem Kelistrikan Kalimantan.....                                   | 41 |
| 4.2   | <i>Modal analysis</i> Kelistrikan Kalimantan Tahun 2023.....                   | 41 |
| 4.2.1   | <i>Eigenvalue</i> Kelistrikan Kalimantan Tahun 2023 .....                      | 42 |
| 4.2.2   | Mode Shape <i>Eigenvalue</i> (Mode 283).....                                   | 43 |
| 4.2.3   | Participation Factor (Mode 283) .....  | 45 |
| 4.3   | <i>Modal analysis</i> Kelistrikan Kalimantan Tahun 2026.....                   | 45 |
| 4.3.1   | <i>Eigenvalue</i> Kelistrikan Kalimantan Tahun 2026 .....                      | 46 |
| 4.3.2   | Mode Shape <i>Eigenvalue</i> (Mode 308).....                                   | 47 |
| 4.3.3   | <i>Participation factor</i> ( Mode 308).....                                   | 49 |
| 4.3.4   | Mode Shape <i>Eigenvalue</i> (Mode 280).....                                   | 50 |
| 4.3.5   | <i>Participation factor</i> ( Mode 280).....                                   | 52 |
| 4.4   | <i>Modal analysis</i> Kelistrikan Kalimantan Tahun 2029.....                   | 52 |
| 4.4.1   | <i>Eigenvalue</i> Kelistrikan Kalimantan Tahun 2029 .....                      | 53 |



|       |  |    |
|-------|--|----|
| 4.4.2 | Mode Shape <i>Eigenvalue</i> ( Mode 378).....                | 54 |
| 4.4.3 | <i>Participation factor</i> (Mode 378).....                  | 57 |
| 4.4.4 | Mode Shape <i>Eigenvalue</i> ( Mode 350).....                | 57 |
| 4.4.5 | <i>Participation factor</i> ( Mode 350).....                 | 59 |
| 4.4.6 | Mode Shape <i>Eigenvalue</i> ( Mode 312).....                | 60 |
| 4.4.7 | <i>Participation factor</i> ( Mode 312).....                 | 62 |
| 4.5   | <i>Modal analysis</i> Kelistrikan Kalimantan Tahun 2032..... | 63 |
| 4.5.1 | <i>Eigenvalue</i> Kelistrikan Kalimantan Tahun 2032.....     | 63 |
| 4.5.2 | Mode Shape <i>Eigenvalue</i> ( Mode 420).....                | 64 |
| 4.5.3 | <i>Participation factor</i> (Mode 420).....                  | 67 |
| 4.5.4 | Mode Shape <i>Eigenvalue</i> ( Mode 358).....                | 67 |
| 4.5.5 | <i>Participation factor</i> ( Mode 358 ).....                | 69 |
| 4.5.6 | Mode Shape <i>Eigenvalue</i> ( Mode 407 ).....               | 70 |
| 4.5.7 | <i>Participation factor</i> ( Mode 407 ).....                | 72 |
| 4.6   | <i>Modal analysis</i> Kelistrikan Kalimantan Tahun 2035..... | 73 |
| 4.6.1 | <i>Eigenvalue</i> Kelistrikan Kalimantan Tahun 2035.....     | 73 |
| 4.6.2 | Mode Shape <i>Eigenvalue</i> (Mode 370).....                 | 74 |
| 4.6.3 | <i>Participation factor</i> (Mode 370).....                  | 76 |
| 4.6.4 | Mode Shape <i>Eigenvalue</i> (Mode 434).....                 | 76 |
| 4.6.5 | <i>Participation factor</i> (Mode 434).....                  | 79 |
| 4.6.6 | Mode Shape <i>Eigenvalue</i> (Mode 426).....                 | 80 |
| 4.6.7 | <i>Participation factor</i> ( Mode 426).....                 | 82 |
| 4.7   | <i>Modal analysis</i> Kelistrikan Kalimantan Tahun 2040..... | 82 |
| 4.7.1 | <i>Eigenvalue</i> Kelistrikan Kalimantan Tahun 2040.....     | 83 |
| 4.7.2 | Mode Shape <i>Eigenvalue</i> (Mode 465).....                 | 84 |
| 4.7.3 | <i>Participation factor</i> (Mode 465).....                  | 85 |
| 4.7.4 | Mode Shape <i>Eigenvalue</i> (Mode 400).....                 | 86 |

|                        |   |     |
|------------------------|---|-----|
| 4.7.5                  | <i>Participation factor</i> (Mode 400).....               | 88  |
| 4.8                    | Modal analysis Kelistrikan Kalimantan Tahun 2045 .....    | 89  |
| 4.8.1                  | <i>Eigenvalue</i> Kelistrikan Kalimantan Tahun 2045 ..... | 89  |
| 4.8.2                  | Mode Shape <i>Eigenvalue</i> (Mode 558).....              | 90  |
| 4.8.3                  | <i>Participation factor</i> ( Mode 558).....              | 92  |
| 4.8.4                  | Mode Shape <i>Eigenvalue</i> (Mode 479).....              | 93  |
| 4.8.5                  | <i>Participation factor</i> ( Mode 479).....              | 95  |
| 4.8.6                  | Mode Shape <i>Eigenvalue</i> (Mode 564).....              | 95  |
| 4.8.7                  | <i>Participation factor</i> ( Mode 564).....              | 98  |
| 4.9                    | Modal analysis Kelistrikan Kalimantan Tahun 2050.....     | 100 |
| 4.9.1                  | <i>Eigenvalue</i> Kelistrikan Kalimantan Tahun 2050 ..... | 100 |
| 4.9.2                  | Mode Shape <i>Eigenvalue</i> (Mode 537).....              | 101 |
| 4.9.3                  | <i>Participation factor</i> ( Mode 537).....              | 103 |
| 4.9.4                  | Mode Shape <i>Eigenvalue</i> (Mode 596).....              | 104 |
| 4.9.5                  | <i>Participation factor</i> ( Mode 596).....              | 106 |
| 4.9.6                  | Mode Shape <i>Eigenvalue</i> (Mode 492).....              | 107 |
| 4.9.7                  | <i>Participation factor</i> ( Mode 492).....              | 109 |
| 4.9.8                  | Mode Shape <i>Eigenvalue</i> ( Mode 541).....             | 110 |
| 4.9.9                  | Participation factor (Mode 541).....                      | 111 |
| 4.9.10                 | Mode Shape <i>Eigenvalue</i> (Mode 446).....              | 112 |
| 4.9.11                 | <i>Participation factor</i> ( Mode 446).....              | 114 |
| BAB 5 PENUTUP .....    |   | 117 |
| 5.1                    | Kesimpulan.....   | 117 |
| 5.2                    | Saran .....   | 117 |
| DAFTAR PUSTAKA .....   |   | 119 |
| LAMPIRAN .....         |   | 121 |
| BIOGRAFI PENULIS ..... |   | 129 |

## DAFTAR GAMBAR

|   |    |
|---|----|
| <b>Gambar 2. 1</b> Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga.....                                      | 6  |
| <b>Gambar 2. 2</b> Sistem Stabil Dengan Tegangan Konstan.....                                     | 9  |
| <b>Gambar 2. 3</b> Non-Oscilatory Instability Dengan Tegangan Konstan ....                        | 9  |
| <b>Gambar 2. 4</b> Sistem Stabil Dengan Kontrol Eksitasi.....                                     | 9  |
| <b>Gambar 2. 5</b> Oscilatory Instability Menggunakan Kontrol Eksitasi ....                       | 10 |
| <b>Gambar 2. 6</b> <i>Mopolar Link [1]</i> .....  | 17 |
| <b>Gambar 2. 7</b> <i>Bipolar Link [1]</i> .....  | 17 |
| <b>Gambar 2. 8</b> <i>Homopolar Link [1]</i> .....  | 18 |
| <b>Gambar 2. 9</b> Grafik Jarak terhadap Biaya Transmisi.....                                     | 19 |
| <b>Gambar 3. 1</b> Sketsa Sistem Kelistrikan Kalimantan AC 500 kV AC ..                           | 22 |
| <b>Gambar 3. 2</b> Sketsa Sistem Kelistrikan Kalimantan AC dengan<br>Transmisi HVDC ke Jawa ..... | 33 |
| <b>Gambar 3. 3</b> <i>CIGRE HVDC Benchmark Model</i> .....  | 34 |
| <b>Gambar 3. 4</b> Toolbar Modal Analysis .....   | 37 |
| <b>Gambar 3. 5</b> <i>Basic Command Modal Analysis</i> .....                                      | 38 |
| <b>Gambar 3. 6</b> <i>Advance Option Modal Analysis</i> .....                                     | 39 |
| <b>Gambar 3. 7</b> Hasil Modal Analysis .....   | 40 |
| <b>Gambar 4. 1</b> Plot <i>Eigenvalue</i> Kelistrikan Kalimantan Tahun 2023.....                  | 42 |
| <b>Gambar 4. 2</b> Phasor Plot <i>Observeability</i> $\delta$ Mode 283 .....                      | 44 |
| <b>Gambar 4. 3</b> Plot <i>Eigenvalue</i> Kelistrikan Kalimantan Tahun 2026.....                  | 46 |
| <b>Gambar 4. 4</b> Phasor Plot <i>Observeability</i> $\delta$ Mode 308 .....                      | 48 |
| <b>Gambar 4. 5</b> Phasor Plot <i>Observeability</i> $\delta$ Mode 280 .....                      | 51 |
| <b>Gambar 4. 6</b> Plot <i>Eigenvalue</i> Kelistrikan Kalimantan Tahun 2029.....                  | 53 |
| <b>Gambar 4. 7</b> Phasor Plot <i>Observeability</i> $\delta$ Mode 378.....                       | 55 |
| <b>Gambar 4. 8</b> Phasor Plot <i>Observeability</i> $\delta$ Mode 350 .....                      | 58 |
| <b>Gambar 4. 9</b> Phasor Plot <i>Observeability</i> $\delta$ Mode 312 .....                      | 61 |
| <b>Gambar 4. 10</b> Plot <i>Eigenvalue</i> Kelistrikan Kalimantan Tahun 2032...                   | 63 |
| <b>Gambar 4. 11</b> Phasor Plot <i>Observeability</i> $\delta$ Mode 420.....                      | 66 |
| <b>Gambar 4. 12</b> Phasor Plot <i>Observeability</i> $\delta$ Mode 358.....                      | 68 |
| <b>Gambar 4. 13</b> Phasor Plot <i>Observeability</i> $\delta$ Mode 407.....                      | 71 |
| <b>Gambar 4. 14</b> Plot <i>Eigenvalue</i> Kelistrikan Kalimantan Tahun 2035...                   | 73 |
| <b>Gambar 4. 15</b> Phasor Plot <i>Observeability</i> $\delta$ Mode 370.....                      | 75 |
| <b>Gambar 4. 16</b> Phasor Plot <i>Observeability</i> $\delta$ Mode 434.....                      | 78 |
| <b>Gambar 4. 17</b> Phasor Plot <i>Observeability</i> $\delta$ Mode 426.....                      | 81 |
| <b>Gambar 4. 18</b> Plot <i>Eigenvalue</i> Kelistrikan Kalimantan Tahun 2040...                   | 83 |

**Gambar 4. 19** Phasor Plot *Observeability*  $\delta$  Mode 465 .....85

**Gambar 4. 20** Phasor Plot *Observeability*  $\delta$  Mode 400 .....87

**Gambar 4. 21** Plot *Eigenvalue* Kelistrikan Kalimantan Tahun 2045 ...89

**Gambar 4. 22** Phasor Plot *Observeability*  $\delta$  Mode 558 .....91

**Gambar 4. 23** Phasor Plot *Observeability*  $\delta$  Mode 479 .....94

**Gambar 4. 24** Phasor Plot *Observeability*  $\delta$  Mode 564 .....97

**Gambar 4. 25** Plot *Eigenvalue* Kelistrikan Kalimantan Tahun 2050 .100

**Gambar 4. 26** Phasor Plot *Observeability*  $\delta$  Mode 537 .....102

**Gambar 4. 27** Phasor Plot *Observeability*  $\delta$  Mode 596 .....105

**Gambar 4. 28** Phasor Plot *Observeability*  $\delta$  Mode 492 .....108

**Gambar 4. 29** Phasor Plot *Observeability*  $\delta$  Mode 541 .....111

**Gambar 4. 30** Phasor Plot *Observeability*  $\delta$  Mode 492 .....113

## DAFTAR TABEL

|                    |  |    |
|--------------------|--|----|
| <b>Tabel 3. 1</b>  | Data Kabel Sistem Kelistrikan Kalimantan 500 kV AC.....                                    | 23 |
| <b>Tabel 3. 2</b>  | Data Transformer Kelistrikan Kalimantan 500 kV AC.....                                     | 23 |
| <b>Tabel 3. 3</b>  | Data Beban Kelistrikan Kalimantan Barat .....  | 24 |
| <b>Tabel 3. 4</b>  | Data Pembangkitan Terpasang Kalimantan Barat .....   | 25 |
| <b>Tabel 3. 5</b>  | Data Penambahan Pembangkitan Tetap Kalimantan Barat .                                      | 25 |
| <b>Tabel 3. 6</b>  | Data Penambahan Pembangkit Variable Kalimantan Barat                                       | 26 |
| <b>Tabel 3. 7</b>  | Data Beban Kelistrikan Kalimantan Selatan dan Tengah....                                   | 26 |
| <b>Tabel 3. 8</b>  | Data Pembangkitan Terpasang Kelistrikan Kalimantan<br>Selatan dan Tengah .....             | 28 |
| <b>Tabel 3. 9</b>  | Data Penambahan Pembangkitan Tetap Kelistrikan<br>Kalimantan Selatan dan Tengah.....       | 28 |
| <b>Tabel 3. 10</b> | Data Penambahan Pembangkit Variable Kelistrikan<br>Kalimantan Selatan dan Tegah.....       | 28 |
| <b>Tabel 3. 11</b> | Data Beban Sistem Kelisitrikan Kalimantan Timur dan<br>Utara.....                          | 29 |
| <b>Tabel 3. 12</b> | Data Pembangkitan Terpasang Sistem Kelistrikan<br>Kalimantan Timur dan Utara.....          | 30 |
| <b>Tabel 3. 13</b> | Data Penambahan Pembangkit Tetap Kelistrikan<br>Kalimantan Timur dan Utara.....            | 31 |
| <b>Tabel 3. 14</b> | Data Penambahan Pembangkit Variable Sistem Kelistrikan<br>Kalimantan Timur dan Utara ..... | 31 |
| <b>Tabel 3. 15</b> | Data Rectifier 6 Pulsa .....   | 35 |
| <b>Tabel 3. 16</b> | Data Inverter 6 Pulsa .....  | 35 |
| <b>Tabel 4. 1</b>  | <i>Eigenvalue</i> dengan Damping Dibawah 10% Tahun 2023 ...                                | 43 |
| <b>Tabel 4. 2</b>  | <i>Observeability</i> $\delta$ Mode 283 .....  | 43 |
| <b>Tabel 4. 3</b>  | <i>Observeability</i> $\omega$ Mode 283.....   | 44 |
| <b>Tabel 4. 4</b>  | <i>Participation factor</i> $\delta$ Mode 283 .....  | 45 |
| <b>Tabel 4. 5</b>  | <i>Participation factor</i> $\omega$ Mode 283 .....  | 45 |
| <b>Tabel 4. 6</b>  | <i>Eigenvalue</i> dengan Damping Dibawah 10% Tahun 2026 ...                                | 47 |
| <b>Tabel 4. 7</b>  | <i>Observeability</i> $\delta$ Mode 308 .....  | 47 |
| <b>Tabel 4. 8</b>  | <i>Observeability</i> $\omega$ Mode 308.....   | 48 |
| <b>Tabel 4. 9</b>  | <i>Participation factor</i> $\delta$ Mode 308 .....  | 49 |
| <b>Tabel 4. 10</b> | <i>Participation factor</i> $\omega$ Mode 308 .....  | 49 |
| <b>Tabel 4. 11</b> | <i>Observeability</i> $\delta$ Mode 280 .....  | 50 |

|                    |   |    |
|--------------------|---|----|
| <b>Tabel 4. 12</b> | <i>Observeability</i> $\omega$ Mode 280 .....             | 51 |
| <b>Tabel 4. 13</b> | <i>Participation factor</i> $\delta$ Mode 280 .....       | 52 |
| <b>Tabel 4. 14</b> | <i>Participation factor</i> $\omega$ Mode 280 .....       | 52 |
| <b>Tabel 4. 15</b> | <i>Eigenvalue</i> dengan Damping Dibawah 10% Tahun 2029.. | 54 |
| <b>Tabel 4. 16</b> | <i>Observeability</i> $\delta$ Mode 378 .....             | 55 |
| <b>Tabel 4. 17</b> | <i>Observeability</i> $\omega$ Mode 378 .....             | 56 |
| <b>Tabel 4. 18</b> | <i>Participation factor</i> $\delta$ Mode 378 .....       | 57 |
| <b>Tabel 4. 19</b> | <i>Participation factor</i> $\omega$ Mode 378 .....       | 57 |
| <b>Tabel 4. 20</b> | <i>Observeability</i> $\delta$ Mode 350 .....             | 58 |
| <b>Tabel 4. 21</b> | <i>Observeability</i> $\omega$ Mode 350 .....             | 59 |
| <b>Tabel 4. 22</b> | <i>Participation factor</i> $\delta$ Mode 308 .....       | 59 |
| <b>Tabel 4. 23</b> | <i>Participation factor</i> $\omega$ Mode 350 .....       | 60 |
| <b>Tabel 4. 24</b> | <i>Observeability</i> $\delta$ Mode 312 .....             | 60 |
| <b>Tabel 4. 25</b> | <i>Observeability</i> $\omega$ Mode 312 .....             | 61 |
| <b>Tabel 4. 26</b> | <i>Participation factor</i> $\delta$ Mode 312 .....       | 62 |
| <b>Tabel 4. 27</b> | <i>Participation factor</i> $\omega$ Mode 312 .....       | 62 |
| <b>Tabel 4. 28</b> | <i>Eigenvalue</i> dengan Damping Dibawah 10% Tahun 2032.. | 64 |
| <b>Tabel 4. 29</b> | <i>Observeability</i> $\delta$ Mode 420 .....             | 65 |
| <b>Tabel 4. 30</b> | <i>Observeability</i> $\omega$ Mode 420 .....             | 66 |
| <b>Tabel 4. 31</b> | <i>Participation factor</i> $\delta$ Mode 420 .....       | 67 |
| <b>Tabel 4. 32</b> | <i>Participation factor</i> $\omega$ Mode 420 .....       | 67 |
| <b>Tabel 4. 33</b> | <i>Observeability</i> $\delta$ Mode 358 .....             | 68 |
| <b>Tabel 4. 34</b> | <i>Observeability</i> $\omega$ Mode 358 .....             | 69 |
| <b>Tabel 4. 35</b> | <i>Participation factor</i> $\delta$ Mode 358 .....       | 69 |
| <b>Tabel 4. 36</b> | <i>Participation factor</i> $\omega$ Mode 358 .....       | 69 |
| <b>Tabel 4. 37</b> | <i>Observeability</i> $\delta$ Mode 407 .....             | 70 |
| <b>Tabel 4. 38</b> | <i>Observeability</i> $\omega$ Mode 407 .....             | 71 |
| <b>Tabel 4. 39</b> | <i>Participation factor</i> $\delta$ Mode 407 .....       | 72 |
| <b>Tabel 4. 40</b> | <i>Participation factor</i> $\omega$ Mode 407 .....       | 72 |
| <b>Tabel 4. 41</b> | <i>Eigenvalue</i> dengan Damping Dibawah 10% Tahun 2035.. | 74 |
| <b>Tabel 4. 42</b> | <i>Observeability</i> $\delta$ Mode 370 .....             | 74 |
| <b>Tabel 4. 43</b> | <i>Observeability</i> $\omega$ Mode 370 .....             | 75 |
| <b>Tabel 4. 44</b> | <i>Participation factor</i> $\delta$ Mode 370 .....       | 76 |
| <b>Tabel 4. 45</b> | <i>Participation factor</i> $\omega$ Mode 370 .....       | 76 |
| <b>Tabel 4. 46</b> | <i>Observeability</i> $\delta$ Mode 434 .....             | 77 |
| <b>Tabel 4. 47</b> | <i>Observeability</i> $\omega$ Mode 434 .....             | 78 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Tabel 4. 48</b> <i>Participation factor</i> $\delta$ Mode 434 .....             | 79  |
| <b>Tabel 4. 49</b> <i>Participation factor</i> $\omega$ Mode 434 .....             | 79  |
| <b>Tabel 4. 50</b> <i>Observeability</i> $\delta$ Mode 426 .....                   | 80  |
| <b>Tabel 4. 51</b> <i>Observeability</i> $\omega$ Mode 426.....                    | 81  |
| <b>Tabel 4. 52</b> <i>Participation factor</i> $\delta$ Mode 426 .....             | 82  |
| <b>Tabel 4. 53</b> <i>Participation factor</i> $\omega$ Mode 426 .....             | 82  |
| <b>Tabel 4. 54</b> <i>Eigenvalue</i> dengan Damping Dibawah 10% Tahun 2040 .       | 84  |
| <b>Tabel 4. 55</b> <i>Observeability</i> $\delta$ Mode 465 .....                   | 84  |
| <b>Tabel 4. 56</b> <i>Observeability</i> $\omega$ Mode 465.....                    | 85  |
| <b>Tabel 4. 57</b> <i>Participation factor</i> $\delta$ Mode 465 .....             | 86  |
| <b>Tabel 4. 58</b> <i>Participation factor</i> $\omega$ Mode 465 .....             | 86  |
| <b>Tabel 4. 59</b> <i>Observeability</i> $\delta$ Mode 400 .....                   | 87  |
| <b>Tabel 4. 60</b> <i>Observeability</i> $\omega$ Mode 400.....                    | 88  |
| <b>Tabel 4. 61</b> <i>Participation factor</i> $\delta$ Mode 400 .....             | 88  |
| <b>Tabel 4. 62</b> <i>Participation factor</i> $\omega$ Mode 400 .....             | 88  |
| <b>Tabel 4. 63</b> <i>Eigenvalue</i> dengan Damping Dibawah 10% Tahun 2045 .       | 90  |
| <b>Tabel 4. 64</b> <i>Observeability</i> $\delta$ Mode 558 .....                   | 91  |
| <b>Tabel 4. 65</b> <i>Observeability</i> $\omega$ Mode 558.....                    | 92  |
| <b>Tabel 4. 66</b> <i>Participation factor</i> $\delta$ Mode 558 .....             | 92  |
| <b>Tabel 4. 67</b> <i>Participation factor</i> $\omega$ Mode 558 .....             | 92  |
| <b>Tabel 4. 68</b> <i>Observeability</i> $\delta$ Mode 479 .....                   | 93  |
| <b>Tabel 4. 69</b> <i>Observeability</i> $\omega$ Mode 479.....                    | 94  |
| <b>Tabel 4. 70</b> <i>Participation factor</i> $\delta$ Mode 479 .....             | 95  |
| <b>Tabel 4. 71</b> <i>Participation factor</i> $\omega$ Mode 479 .....             | 95  |
| <b>Tabel 4. 72</b> <i>Observeability</i> $\delta$ Mode 564 .....                   | 96  |
| <b>Tabel 4. 73</b> <i>Observeability</i> $\omega$ Mode 564.....                    | 97  |
| <b>Tabel 4. 74</b> <i>Participation factor</i> $\delta$ Mode 564 .....             | 98  |
| <b>Tabel 4. 755</b> (Lanjutan) <i>Participation factor</i> $\delta$ Mode 564 ..... | 99  |
| <b>Tabel 4. 76</b> <i>Participation factor</i> $\omega$ Mode 564 .....             | 99  |
| <b>Tabel 4. 77</b> <i>Eigenvalue</i> dengan Damping Dibawah 10% Tahun 2050         | 101 |
| <b>Tabel 4. 78</b> <i>Observeability</i> $\delta$ Mode 537 .....                   | 101 |
| <b>Tabel 4. 79</b> <i>Observeability</i> $\omega$ Mode 537.....                    | 102 |
| <b>Tabel 4. 80</b> <i>Participation factor</i> $\delta$ Mode 537 .....             | 103 |
| <b>Tabel 4. 81</b> <i>Participation factor</i> $\omega$ Mode 537 .....             | 103 |
| <b>Tabel 4. 82</b> <i>Observeability</i> $\delta$ Mode 596 .....                   | 104 |
| <b>Tabel 4. 83</b> <i>Observeability</i> $\omega$ Mode 596.....                    | 105 |

**Tabel 4. 84** *Participation factor*  $\delta$  Mode 596.....106

**Tabel 4. 85** *Participation factor*  $\omega$  Mode 596 .....106

**Tabel 4. 86** *Observeability*  $\delta$  Mode 492 .....107

**Tabel 4. 87** *Observeability*  $\omega$  Mode 492 .....109

**Tabel 4. 88** *Participation factor*  $\delta$  Mode 492.....109

**Tabel 4. 89** *Participation factor*  $\omega$  Mode 492 .....110

**Tabel 4. 90** *Observeability*  $\delta$  Mode 541 .....110

**Tabel 4. 91** *Participation factor*  $\delta$  Mode 541 .....112

**Tabel 4. 92** *Participation factor*  $\omega$  Mode 541 .....112

**Tabel 4. 93** *Observeability*  $\delta$  Mode 446 .....113

**Tabel 4. 94** *Observeability*  $\omega$  Mode 446 .....114

**Tabel 4. 95** *Participation factor*  $\delta$  Mode 446.....114

**Tabel 4. 96** *Participation factor*  $\omega$  Mode 446 .....114



*Halaman ini sengaja dikosongkan*



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara kepulauan terbesar di dunia, dimana terdiri dari 5 pulau besar yaitu Sumatra, Jawa, Kalimantan, Sulawesi, dan Papua, selain itu terdapat juga sekitar 17.000 pulau-pulau kecil lainnya. Sistem kelistrikan di Kalimantan sendiri memiliki kebutuhan daya yang lebih rendah jika dibandingkan dengan sistem kelistrikan Jawa-Bali namun memiliki potensi energi yang melimpah dikarenakan Kalimantan merupakan lumbung energi nasional sebagai penghasil batubara dan migas terbesar.

Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) diharapkan dapat meningkatkan rasio elektrifikasi nasional salah satu caranya adalah dengan mengembangkan sistem kelistrikan untuk memenuhi kebutuhan energi listrik, pada sistem kelistrikan Kalimantan direncanakan pengembangan sistem kelistrikan Kalimantan dengan melakukan interkoneksi untuk sistem kelistrikan Kalimantan kedepannya. Melimpahnya sumber energi di pulau Kalimantan, menjadikan pembangunan pembangkit sangat memungkinkan dibangun di Kalimantan namun pertumbuhan beban yang lambat dapat mengakibatkan daya yang dibangkitkan akan lama terserap oleh beban sehingga dapat menimbulkan kerugian, adanya skenario pemanfaatan energi air di Kalimantan Utara karena pertumbuhan beban yang lambat oleh karena itu memungkinkan daya yang dibangkitkan di salurkan ke luar Kalimantan dalam hal ini dengan sistem kelistrikan Jawa menggunakan saluran 500 kV *high voltage direct current (HVDC)*

Seiring dengan bertambahnya beban dan terjadinya fluktuasi beban pada sistem kelistrikan Kalimantan oleh karena itu diperlukan studi kestabilan *small signal stability* dimana dapat melihat kestabilan sistem saat terjadi gangguan-gangguan kecil dengan menggunakan Analisis Modal kita bisa mendapatkan nilai-nilai dari *eigenvalue* sistem dimana berdasarkan nilai-nilai *eigenvalue* ini dapat dilihat karakteristik sistem dan kestabilan sistem tersebut. Gangguan kecil pada saat kondisi beban puncak, karena fenomena tidak dapat di amati di transient stability, Karena AVR dan Governor sudah bekerja, dan dengan *modal analysis* dapat dicari sumber yang menyebabkan sistem tidak stabil sehingga mudah bagi seorang *dispatcher* untuk bisa *rescheduling* serta melakukan pengaturan daya.

## 1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang akan dibahas dalam Tugas Akhir ini adalah :

1. Memodelkan sistem kelistrikan kalimantan yang saling terinterkoneksi dengan menggunakan tegangan 500 kV AC
2. Memodelkan sistem transmisi *high voltage direct current* untuk menyalurkan daya menuju beban di Jawa.
3. Menganalisis kestabilan berdasarkan nilai *eigenvalue* yang didapatkan tiap tahunnya.

## 1.3 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dalam Tugas Akhir ini adalah:

1. Dapat memodelkan, mendesain dan simulasi sistem kelistrikan Kalimantan hingga tahun 2050.
2. Mendapatkan dan menganalisis kestabilan sistem kelistrikan Kalimantan berdasarkan nilai *eigenvalue* yang didapatkan dari Analisis Modal.
3. Mengetahui kestabilan *small signal stabilty* sistem kelistrikan Kalimantan hingga tahun 2050.

## 1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada Tugas Akhir ini adalah :

1. Jawa diasumsikan sebagai beban statis yang berjarak 500 km dari Banjarmasin (Kalimantan Selatan) dengan daya yang di transfer sebesar 1 GW dan beroperasi pada tahun 2032.
2. Nilai *eigenvalue* yang akan di perhatikan adalah *eigenvalue* dengan mode elektromekanikal yaitu pada frekuensi 0,1-3 Hz dengan *damping ratio* dibawah 5 %.
3. Analisis akan dilakukan setiap tiga tahun sekali pada tahun 2023-2035 dan setiap lima tahun sekali pada tahun 2035-2050.

## 1.5 Metodologi

Metodologi yang digunakan dalam menyusun penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Studi pustaka

Studi pustaka yang dilakukan yaitu mengenai kestabilan sistem tenaga pada hal ini mengenai *small signal staility*, pada tahap ini akan dicari literatur-literatur yang berhubungan dengan topik yang di bahas. Selanjutnya dilakukan kajian untuk mengetahui bagian-bagian yang dapat diadopsi dan di kembangkan pada penelitian ini.

2. Pengumpulan Data

Pada tahap ini dilakukan pengumpulan data yang dibutuhkan untuk memodelkan sistem kelistrikan Kalimantan, data-data yang dibutuhkan adalah data beban, pembangkit, dan peralatan.

3. Pemodelan Sistem

Pada tahap ini dilakukan pemodelan sistem berdasarkan data yang telah diperoleh sebelumnya kedalam *single line* diagram dan dimodelkan pada software *DigSILENT PowerFactory*. Pemodelan sistem digunakan untuk mensimulasikan analisis kestabilan. pemodelan berdasarkan peta sistem kelistrikan Kalimantan yang terhubung ke Jawa.

4. Simulasi dan Analisis Kestabilan

Dari hasil simuasi menggunakan *Modal analysis* didapatkan nilai *eigenvalue* yang selanjutnya dianalisis untuk menentukan kestabilan sistem.

5. Kesimpulan

Pada akhir penelitian akan ditarik kesimpulan berdasarkan analisis yang telah dilakukan.

## 1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam tugas akhir ini terdiri atas lima bab dengan uraian sebagai berikut :

Bab 1 : Pendahuluan

Bab ini membahas tentang penjelasan mengenai latar belakang, permasalahan dan batasan masalah, tujuan, metode penelitian, sistematika pembahasan, dan relevansi.

Bab 2 : Kajian Pustaka

Bab ini membahas mengenai dasar teori yang digunakan untuk menunjang penyusunan tugas akhir ini.

Bab 3 : Perancangan Sistem Kelistrikan Kalimantan

Bab ini membahas mengenai sistem kelistrikan Kalimantan dan pengembangannya beserta data-data penunjang yang digunakan untuk penulisan Tugas Akhir.

Bab 4 : Simulasi dan Analisis

Bab ini membahas hasil simulasi dengan memperhatikan nilai *eigenvalue* yang didapatkan, dan melihat *observeability* atau *mode shape* dan *participation factor* dari *eigenvalue* yang didapat.

Bab 5 : Penutup

Bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran dari hasil pembahasan yang telah dilakukan.

## 1.7 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari Tugas Akhir ini diharapkan memberi manfaat sebagai berikut :

1. Sebagai acuan untuk PT. PLN mengenai kelayakan sistem kelistrikan Kalimantan dari sisi kestabilan *small signal stability*.
2. Dapat dijadikan referensi untuk penelitian selanjutnya yang hendak mengambil topik serupa.

## **BAB 2**

### **KAJIAN PUSTAKA**

#### **2.1 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik**

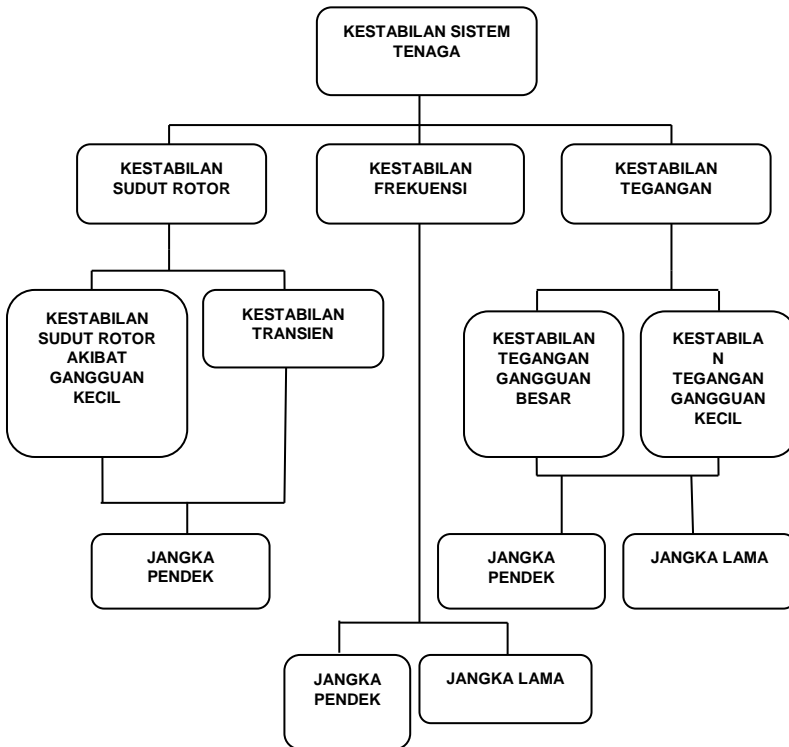
Kestabilan sistem tenaga listrik dapat didefinisikan sebagai bagian dari sistem tenaga listrik yang merupakan kemampuan sistem tenaga untuk tetap berada dalam kondisi operasi yang seimbang atau dalam kondisi operasi normal, dan kemampuan sistem untuk mendapatkan kondisi yang seimbang ataupun kondisi yang dapat diterima setelah mengalami gangguan [1]. Ketidakstabilan dalam sistem tenaga adalah kondisi dimana sistem tenaga tidak mampu menjaga kondisi sinkronnya atau tidak dapat kembali menuju operasi normal setelah mengalami gangguan besar maupun gangguan kecil.

Pada kestabilan sistem tenaga yang menjadi perhatian adalah perilaku dari sistem setelah mengalami gangguan transien. Sistem yang dikatakan stabil akan mampu mempertahankan sinkronisasinya hingga akhir dari periode gangguan dimana sistem dapat mencapai kondisi mantap (*steady state*). Respons osilasi sistem tenaga dinyatakan stabil bila gangguan mengalami peredaman selama periode transien hingga mencapai kondisi mantap (*steady state*), namun apabila respon osilasi pada sistem tidak mengalami redaman atau tidak ter-redam maka sistem dinyatakan tidak stabil [1]. Sistem yang baik adalah sistem yang dapat meredam osilasi saat terjadi gangguan kembali ke kondisi *steady*. Gangguan bisa berupa gangguan kecil maupun gangguan besar, pada gangguan kecil perubahan beban maupun perubahan pada operasi pembangkitan. Sistem harus mampu bekerja dengan baik dan memenuhi kebutuhan beban setelah terjadi perubahan beban. Sistem tenaga juga harus mampu menjaga sinkronisasinya setelah mengalami gangguan besar yang terjadi pada sistem, gangguan besar dapat berupa gangguan hubung singkat pada saluran, lepasnya generator besar maupun beban besar dari sistem, atau putusnya saluran yang menghubungkan dua subsistem.

#### **2.2 Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga**

Berdasarkan referensi [2] dari paper IEEE Transactions On Power Systems dengan judul Definition and Classification of Power System Stability, kestabilan sistem tenaga listrik dikategorikan menjadi tiga yaitu:

1. Kestabilan sudut rotor
2. Kestabilan frekuensi
3. Kestabilan tegangan



**Gambar 2. 1** Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga

### 2.3 Kestabilan Sudut Rotor

Kestabilan sudut rotor adalah kemampuan mesin sinkron yang saling terhubung pada sistem tenaga untuk menjaga sinkronisasinya. Osilasi elektromekanikal pada sistem tenaga sangat melekat dengan permasalahan kestabilan sudut rotor. Faktor fundamental yang menyebabkan kestabilan sudut rotor adalah keluaran daya dari mesin sinkron berbeda satu sama lain saat rotor berosilasi. Pada kondisi mantap



(*steady state*) terdapat kondisi dimana masukan torsi mekanikal dan keluaran torsi elektrik adalah sama dan kecepatan dijaga konstan, namun jika kondisi tersebut diberikan gangguan atau mengalami gangguan kestabilan sistem akan berubah dan mengakibatkan rotor mesin akan mengalami percepatan atau perlambatan.

Pada saat keadaan dimana mesin sinkron kehilangan sinkronisasinya atau biasa disebut dengan *fall out of step*, rotor akan bergerak pada kecepatan tertinggi atau dalam kecepatan terendahnya dibandingkan dengan kecepatan yang dibutuhkan untuk membangkitkan tegangan pada frekuensi sistem. *Slip* antara stator yang berputar dan kumparan rotor mengakibatkan fluktuasi yang besar pada keluaran daya mesin, arus, dan tegangan dan mengharuskan sistem proteksi untuk mengisolasi mesin sinkron yang tidak stabil dari sistem.

Pada sistem tenaga listrik, perubahan pada torsi elektrik dari mesin sinkron akibat dari gangguan dapat di bentuk dalam persamaan :

$$\Delta T_e = T_s \Delta \delta + T_D \Delta \omega \quad (2.1)$$

Dimana

$T_s \Delta \delta$  adalah komponen dari perubahan torsi pada fasa dengan sudut rotor gangguan ( $\Delta \delta$ ) dan dapat disebut juga dengan komponen sinkronisasi torsi; dan  $T_s$  adalah koefisien sinkronisasi torsi.

$T_D \Delta \omega$  adalah komponen torsi dengan fasa pada perubahan kecepatan ( $\Delta \omega$ ) dan disebut juga sebagai torsi redaman; dan  $T_D$  adalah koefisien torsi redaman.

Kestabilan sistem bergantung pada kedua komponen pada persamaan 2.1 yaitu pada komponen torsi. Kurangnya torsi sinkronisasi menyebabkan ketidakstabilan pada sudut rotor, sedangkan kurangnya torsi redaman menyebabkan ketidakstabilan osilasi.

Kestabilan Sudut Rotor adalah kemampuan dari mesin-mesin sinkron yang saling berhubungan atau terinterkoneksi untuk mempertahankan kondisi sinkronnya setelah terjadi gangguan. Pada kestabilan sudut rotor di kategorikan menjadi dua yaitu :

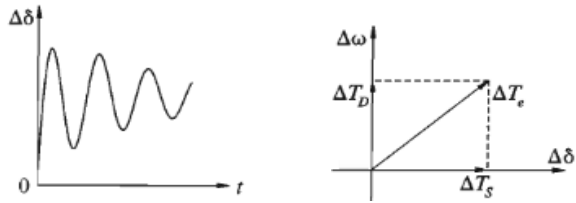
1. *Small-signal (small-disturbance) stability* adalah kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan kondisi sinkronnya setelah mengalami gangguan kecil. Seperti gangguan yang

terjadi secara kontiniu pada sistem seperti perubahan beban ataupun pembangkitan. Ketidakstabilan ini terjadi akibat dua hal antara lain kurangnya torsi sinkronisasi dan kurangnya torsi damping.

2. *Transient stability* adalah kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan kondisi setelah mengalami gangguan besar untuk studi gangguan stabilitas transien memiliki kurun waktu 3-5 detik setelah terjadi gangguan untuk sistem yang sangat besar dengan ayunan antar wilayah yang dominan maka kurun waktu dapat diperpanjang menjadi 10-20 detik.

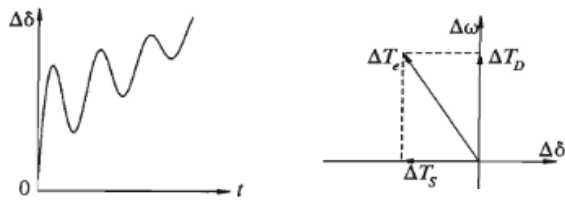
## 2.4 Small Signal Stability

*Small signal stability* adalah kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan kondisi sinkronnya setelah mengalami gangguan kecil. Seperti gangguan yang terjadi secara kontiniu pada sistem seperti perubahan beban ataupun pembangkitan. Pada konteks ini gangguan di pertimbangkan sebagai gangguan kecil jika persamaan yang merupakan respon dari sistem dapat dilinierisasi untuk tujuan analisis. Ketidakstabilan pada *small signal stability* dapat berupa kenaikan konstan pada sudut rotor generator dikarenakan kurangnya torsi sinkronisasi atau dapat berupa osilasi rotor dan kenaikan amplitudo karena kurangnya torsi redaman. Dewasa ini permasalahan *small signal stability* biasanya di karenakan kurangnya redaman osilasi sistem. Respon dari sistem untuk gangguan kecil bergantung pada banyak faktor termasuk dari kondisi awal operasinya, kekuatan saluran transmisi dan kontrol eksitasi generator, tanpa adanya *automatic voltage regulator* ketidakstabilan yang dikarenakan oleh kurangnya torsi sinkronisasi menyebabkan ketidakstabilan *non-osilasi*, sedangkan dengan adanya *automatic voltage regulator* gangguan kecil menyebabkan terjadinya ketidakstabilan osilasi yang dapat di ilustrasikan seperti gambar berikut ini :



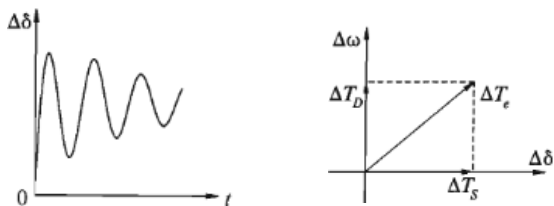
**Gambar 2. 2** Sistem Stabil Dengan Tegangan Konstan

Gambar 2.2 merupakan respon sistem tenaga dengan tegangan konstan yang stabil dengan nilai torsi redaman dan torsi sinkronisasi bernilai positif.



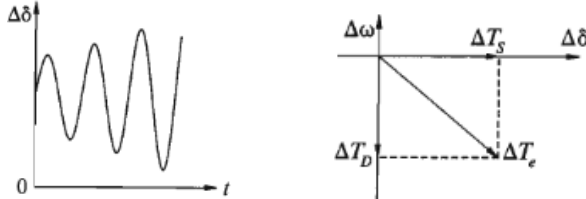
**Gambar 2. 3** Non-Oscillatory Instability Dengan Tegangan Konstan

Gambar 2.3 merupakan respon sistem tenaga yang tidak stabil dengan menggunakan tegangan konstan dengan nilai torsi redaman positif sedangkan torsi sinkronisasi bernilai negatif.



**Gambar 2. 4** Sistem Stabil Dengan Kontrol Eksitasi

Gambar 2.4 merupakan respon sistem tenaga yang tidak stabil dengan menggunakan kontrol eksitasi dimana nilai torsi redaman positif sedangkan torsi sinkronisasi bernilai negatif.



**Gambar 2. 5** Oscillatory Instability Menggunakan Kontrol Eksitasi

Gambar 2.5 merupakan respon sistem tenaga yang tidak stabil dengan menggunakan kontrol eksitasi dimana nilai torsi redaman negatif sedangkan torsi sinkronisasi bernilai positif.

Perubahan pada sistem tenaga seperti perubahan tegangan, arus, dan aliran daya antara area yang berbeda. Sistem tenaga yang besar akan memiliki mode osilasi elektromekanikal yang dominan pada saat terjadi gangguan. Mode osilasi elektromekanika di klasifikasikan berdasarkan [1] sebagai berikut :

1. *Mode Inter-area* pada frekuensi 0.1-0.8 Hz  
 Pada mode inter-area dimana generator dari dua area yang berbeda saling ber-osilasi satu sama dengan yang lain. Mode ini dapat muncul saat terjadi gangguan pada saluran yang menghubungkan kedua area pembangkitan ini atau pada saluran transmisi yang di matikan untuk keperluan pemeliharaan.
2. *Mode Local area* pada frekuensi 0.7-2 Hz  
 Pada mode lokal area ini dimana generator pada satu area yang sama saling berosilasi satu dengan yang lain. Mode ini dapat muncul saat terjadi gangguan yang letaknya dekat dengan area generator tersebut.

## 2.5 Analisis Modal

Analisis modal atau *modal analysis* adalah salah satu metode yang digunakan untuk analisis kestabilan yang dikarenakan oleh gangguan kecil atau biasa disebut dengan *small signal stability, modal analysis*

biasa juga disebut dengan perhitungan *eigenvalue* dimana *eigenvalue* dapat memberikan informasi tentang kestabilan sistem tenaga.

### 2.5.1 State Space

Karakteristik dari sistem dinamis seperti sistem tenaga dapat di deksripsikan sebagai persamaan diferensial dimana dapat di tuliskan sebagai berikut :

$$\dot{x} = f(x, u, t) \quad (2.2)$$

dimana

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix} \quad f = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix}$$

$\mathbf{x}$  adalah sebagai *state vector* dan  $x_i$  sebagai *state variable*, sedangkan  $\mathbf{u}$  adalah sebagai masukan ke sistem. Waktu di notasikan sebagai  $t$  dan *state variable* yang berhubungan dengan waktu di notasikan sebagai  $\dot{x}$  jika turunan dari *state variable* sistem tidak merupakan persamaan yang berhubungan dengan waktu maka sistem dapat dikatakan *autonom* persamaan dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (2.3)$$

Sedangkan untuk keluaran dari sistem dimana kita dapat melihatnya dari sistem dapat pula di notasikan dalam bentuk *state variable* dan *input variable* :

$$y = g(x, u) \quad (2.4)$$

*state variable*  $x$  meliputi kecepatan rotor, sudut rotor dan semua variabel yang ada pada generator, seperti pada contoh berikut :

$$x = \begin{bmatrix} \delta_{gen1} \\ \delta_{gen2} \\ \omega_{gen1} \\ \omega_{gen2} \\ \vdots \end{bmatrix}$$

Jumlah dari *state variable* bergantung pada model yang digunakan untuk merepresentasikan generator serta banyaknya generator pada sistem, namun pada mode electromekanikal variabel yang sangat berpengaruh adalah sudut rotor  $\delta_i$  dan kecepatan sudut rotor dari generator  $\omega_i$ . *State variable*  $y$  meliputi variabel keluaran dari sistem seperti tegangan pada bus  $U_i$  sudut tengangannya  $\theta_i$ .

$$y = \begin{bmatrix} U_{Bus1} \\ U_{Bus2} \\ \theta_{Bus1} \\ \theta_{Bus2} \\ \vdots \end{bmatrix}$$

### 2.5.2 Titik Ekuilibrium

Titik ekuilibrium adalah titik dimana semua turunan  $\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dots, \dot{x}_n$  bernilai nol. Dimana dapat dituliskan dalam persamaan sebagai berikut :

$$f(x_0) = 0 \quad (2.5)$$

Dimana  $x_0$  adalah *state vector*  $x$  pada titik ekuilibrium.

### 2.5.3 Linierisasi

Untuk mendapatkan performansi *small signal stability* yang akan di perhatikan oleh karena itu sistem harus di linierisasi pada titik ekuilibriumnya dan stabilitas dapat dilihat dari nilai *eigenvalue* yang didapatkan setelah sistem di linierisasi sebagai berikut:

$$\dot{x}_0 = f(x_0, u_0) = 0 \quad (2.6)$$

state diasumsikan diberikan gangguan sebagai berikut:

$$x = x_0 + \Delta x \quad u = u_0 + \Delta u$$

Dimana  $\Delta$  merupakan perubahan kecil, sehingga didapatkan state baru sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \dot{x}_0 + \Delta \dot{x} \\ \dot{x} &= f[(x_0 + \Delta x), (u_0 + \Delta u)] \end{aligned} \quad (2.7)$$

Karena gangguan dianggap kecil fungsi  $f(x,u)$  dapat di tuliskan dalam bentuk deret Taylor dengan mengabaikan orde kedua dan selanjutnya dari  $\Delta x$  dan  $\Delta u$  sehingga dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\dot{x}_i = \dot{x}_{i0} + \Delta \dot{x}_i = f[(x_0 + \Delta x), (u_0 + \Delta u)]$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_i = f_i(x_0, u_0) &+ \frac{\partial f_i}{\partial x_i} \Delta x_i + \dots + \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \Delta x_n \\ &+ \frac{\partial f_i}{\partial u_i} \Delta u_i + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial u_r} \Delta u_r \end{aligned}$$

Karena  $\dot{x}_0 = f(x_0, u_0) = 0$ , didapatkan

$$\Delta \dot{x}_i = \frac{\partial f_i}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \Delta x_n + \frac{\partial f_i}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial u_r} \Delta u_r$$

begitu jagan dengan *state variable* keluaran dari sistem didapatkan

$$\Delta y_i = \frac{\partial g_j}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial g_j}{\partial x_n} \Delta x_n + \frac{\partial g_j}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial g_j}{\partial u_r} \Delta u_r$$

Sehingga bentuk *state space* yang telah di linierisasi di titik ekuilibrium dapat dituliskan sebagai berikut

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{B} \Delta \mathbf{u} \quad (2.8)$$

$$\Delta \mathbf{y} = \mathbf{C} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{D} \Delta \mathbf{u} \quad (2.9)$$

#### 2.5.4 Eigenvalue

*Eigenvalue* adalah sebuah bilangan skalar dari sebuah matrix  $A$  yang dapat menjadi suatu karakteristik dari sebuah matriks *eigenvalue* dinotasikan sebagai  $\lambda$  dimana *eigenvalue* atau biasa juga disebut dengan akar ciri atau merupakan suatu nilai yang dapat menunjukkan seberapa besar pengaruh suatu variable terhadap pembentukan karakteristik sebuah matriks, *eigenvalue* didapatkan berdasarkan persamaan :

$$(2.10)$$

$$\mathbf{A} \boldsymbol{\phi} = \lambda \boldsymbol{\phi}$$

Berdasarkan persamaan 2.10, nilai *eigenvalue* didapatkan dari:

$$(A - \lambda I)\phi = 0 \quad (2.11)$$

Karena  $\phi \neq 0$  maka didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$\det(A - \lambda I) = 0 \quad (2.12)$$

Keterangan,

**A**        Matriks  $n \times n$   
**I**        Matrik identitas  $n \times n$

*Eigenvalue* dapat berupa bilangan *real* atau kompleks. Jika matriks  $A$  adalah *real* maka nilai *eigenvalue* yang akan muncul dapat berupa bilangan kompleks.

### 2.5.5 Eigenvector

Untuk setiap nilai *eigenvalue*  $\lambda$ ,  $n$ -kolom *vector*  $\Phi$  disebut dengan *eigenvector* kanan dari matriks  $A$  yang berhubungan dengan nilai *eigenvalue*  $\lambda$  sehingga didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$A\Phi_i = \lambda_i\Phi_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.13)$$

*Eigenvector* kanan memiliki bentuk sebagai berikut

$$\Phi_i = \begin{bmatrix} \Phi_{1i} \\ \Phi_{2i} \\ \vdots \\ \Phi_{ni} \end{bmatrix}$$

Karena persamaan  $(A - \lambda I)\Phi_i$  adalah homogen,  $k\Phi_i$  juga merupakan solusi, *eigenvector* yang ditentukan hanya oleh faktor pengali skalar atau dapat ditulis sebagai berikut :

$$\psi_i A = \lambda_i \psi_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.14)$$

$\psi_i$  disebut dengan *eigenvector* kiri yang berhubungan dengan nilai *eigenvalue*. *Eigenvector* kiri memiliki bentuk sebagai berikut

$$\psi_i = [\psi_{i1} \psi_{i2} \dots \psi_{i3}]$$



### 2.5.6 Eigenvalue dan Kestabilan

Karakteristik suatu mode yang berdomain waktu pada sistem berdasarkan *eigenvalue*  $\lambda$  adalah sesuai dengan persamaan  $e^{\lambda t}$  sehingga sistem dapat ditentukan kestabilannya berdasarkan *eigenvalue* dengan ketentuan sebagai berikut :

- a. *Eigenvalue real* berhubungan dengan mode non-osilasi. Nilai *real* negatif dari *eigenvalue* menunjukkan mode penurunan atau *decaying mode*. Semakin besar magnitudenya semakin cepat. Nilai *real* positif dari *eigenvalue* menunjukkan ketidakstabilan sistem.
- b. *Eigenvalue* kompleks muncul dalam bentuk pasangan konjugasi, tiap nilai berhubungan dengan mode osilasi. Nilai *real* dari *eigenvalue* kompleks memberikan informasi tentang redaman sedangkan bagian imajiner memberikan informasi tentang frekuensi osilasi. Nilai negatif dari bagian *real* menunjukkan osilasi yang teredam sedangkan nilai positif menunjukkan osilasi yang amplitudonya terus meningkat. *Eigenvalue* kompleks diberikan sebagai berikut :

$$\lambda = \sigma \pm j\omega \quad (2.15)$$

Dimana frekuensi osilasi dalam Hz didapatkan :

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (2.16)$$

Dan rasio redaman didapatkan berdasarkan :

$$\zeta = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \quad (2.17)$$

### 2.5.7 Eigenvector Kanan – Mode Shape

Matriks dari *eigenvector* kanan  $\Phi$  bisa juga disebut sebagai *mode shape*. Setiap *mode shape*  $\Phi$  memberikan informasi spesifik tentang aktivitas dari *state variable*  $\Delta x$  saat terjadi mode osilasi. Variasi dari suatu *state variable* saat muncul suatu mode adalah :

$$\Delta x_i = \sum_{j=1}^{j=n} \phi_{ij} \xi_j \quad (2.18)$$

Koefisien dari  $\Phi$  memberikan informasi bagaimana *state variable*  $x_i$  akan terdampak pada saat terjadi mode osilasi. Semakin besar magnitude dari  $\Phi$  semakin besar pula *state variable* terdampak sehingga *state variable* tersebut dapat diamati oleh karena ini *eigenvector* kanan dapat juga disebut sebagai *observeability*. *Mode shape* juga memberikan informasi mengenai variasi yang disebabkan oleh suatu mode, ini dapat digunakan untuk mengumpulkan generator yang memiliki karakteristik yang sama dan untuk mengetahui tipe dari osilasi baik itu osilasi inter-area, lokal, maupun intra-area.

### 2.5.8 Participation Factor

*Mode shape* dapat digunakan untuk mengetahui *state variable* mana yang dapat dengan mudah dilihat atau dalam hal ini disebut dengan *observeability*. Namun belum memberikan informasi *state variable* mana yang memberikan kontribusi terhadap nilai *eigenvalue*. *Participation factor* merupakan kombinasi dari *eigenvector* kanan dan kiri yang dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\mathbf{P} = [\mathbf{P}_1 \mathbf{P}_2 \dots \mathbf{P}_n] \quad (2.19)$$

Dengan

$$P_i = \begin{bmatrix} P_{1i} \\ P_{2i} \\ \vdots \\ P_{ni} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{1i} \psi_{i1} \\ \phi_{2i} \psi_{i2} \\ \vdots \\ \phi_{ni} \psi_{in} \end{bmatrix}$$

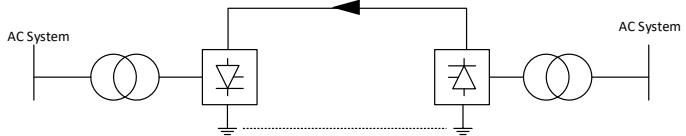
*Participation factor* digunakan untuk menentukan *state variable* atau generator mana yang sangat berpengaruh terhadap suatu mode atau terhadap suatu nilai *eigenvalue*.

## 2.6 High Voltage Direct Current

Saluran Transmisi Arus searah merupakan teknologi yang sudah lama namun baru berkembang untuk saluran transmisi setelah berkembangnya konverter-konverter yang mampu mengubah tegangan AC menjadi DC. Secara garis besar *HVDC Link* diklasifikasi kan menjadi tiga kategori , yaitu [1]:

a. *Monopolar Link*

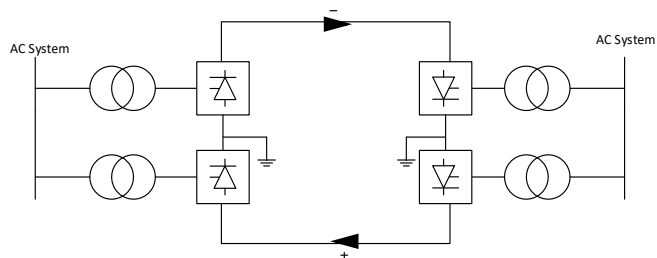
Pada konfigurasi ini hanya menggunakan satu konduktor dengan polaritas negatif dan *ground return*.



**Gambar 2. 6 Mopolar Link [1]**

b. *Bipolar Link*

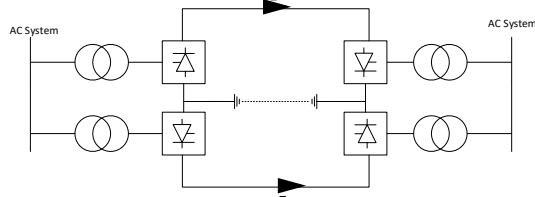
Pada konfigurasi ini terdapat dua konduktor, positif dan negatif. Pada tiap terminal tedapat dua konverter yang sesuai dengan level tegangan yang terhubung dengan sisi DC. Pada persimpangan antar konverter dketanahkan biasanya arus mengalir pada kedua pole dengan besar arus yang sama dan tidak terdapat arus yang mengalir menuju tanah(*ground*).



**Gambar 2. 7 Bipolar Link [1]**

c. *Homopolar Link*

Pada konfigurasi ini terdapat dua konduktor namun memiliki polaritas yang sama biasanya merupakan polaritas negatif. Digunakan polaritas negatif dikarenakan dapat mengurangi interfrensi radio yang disebabkan oleh korona.



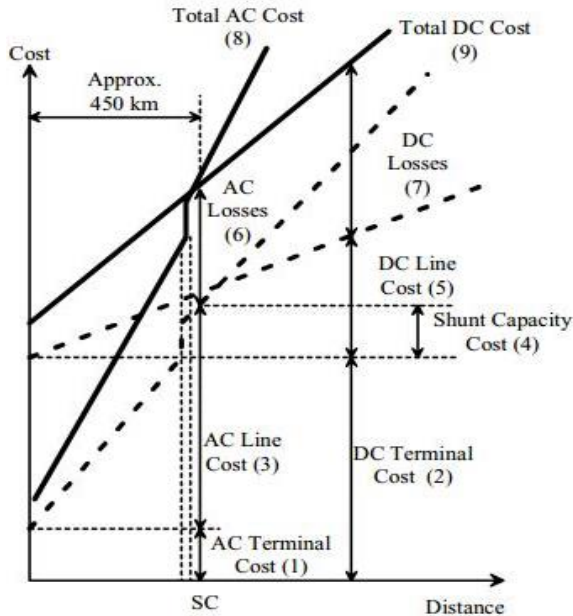
**Gambar 2. 8** *Homopolar Link [1]*

### 2.6.1 Keuntungan dan Kerugian Transmisi HVDC

Pada sistem transmisi HVDC memiliki beberapa keuntungan dan kerugian jika dibandingkan dengan sistem transmisi HVAC beberapa keuntungan dan kerugian tersebut adalah sebagai berikut ini akan di berikan keuntungan utama penggunaan sistem transmisi HVDC :

- Sistem HVDC adalah sistem asinkron, dimana merupakan keuntungan karena tidak akan menyebabkan masalah kestabilan pada sistem. Dua buah sistem yang dihubungkan dengan transmisi HVDC tidak harus memiliki frekuensi yang sama dan tidak perlu sinkron satu sama lain, serta masalah panjang saluran juga tidak dibatasi oleh masalah kestabilan.
- Interkoneksi dua sistem AC menggunakan HVDC tidak akan meningkatkan *short circuit ratio* sehingga sangat menguntungkan untuk investasi *switchgear*.
- Rugi korona dan Radio Interferene lebih baik DC daripada AC
- Faktor daya pada saluran HVDC selalu bernilai satu, sehingga tidak diperlukan kompensasi daya reaktif oleh karena itu rugi-rugi saluran HVDC lebih rendah jika dibandingkan dengan HVAC
- Jika biaya investasi konverter tidak dihitung, maka harga untuk saluran kabel HVDC akan lebih murah jika dibandingkan dengan HVAC, namun investasi pada saluran kabel DC akan

mengalami *break even point* atau kembali modal untuk 600 km saluran udara, 30 km untuk kabel bawah laut dan untuk kabel tanam. Jika jarak yang digunakan tidak melebihi *break even point* maka saluran HVAC akan lebih murah jika dibanding dengan saluran HVDC.



**Gambar 2. 9** Grafik Jarak terhadap Biaya Transmisi

Sedangkan kelemahan sistem transmisi HVDC jika dibandingkan dengan sistem transmisi HVAC adalah sebagai berikut:

- Konverter menyebabkan tegangan dan arus harmonisa pada sisi AC maupun DC sehingga dibutuhkan filter harmonisa.
- Konverter memerlukan daya reaktif untuk mengubah daya baik dari AC menjadi DC maupun sebaliknya
- Gardu induk untuk konverter memerlukan biaya investasi yang tinggi

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

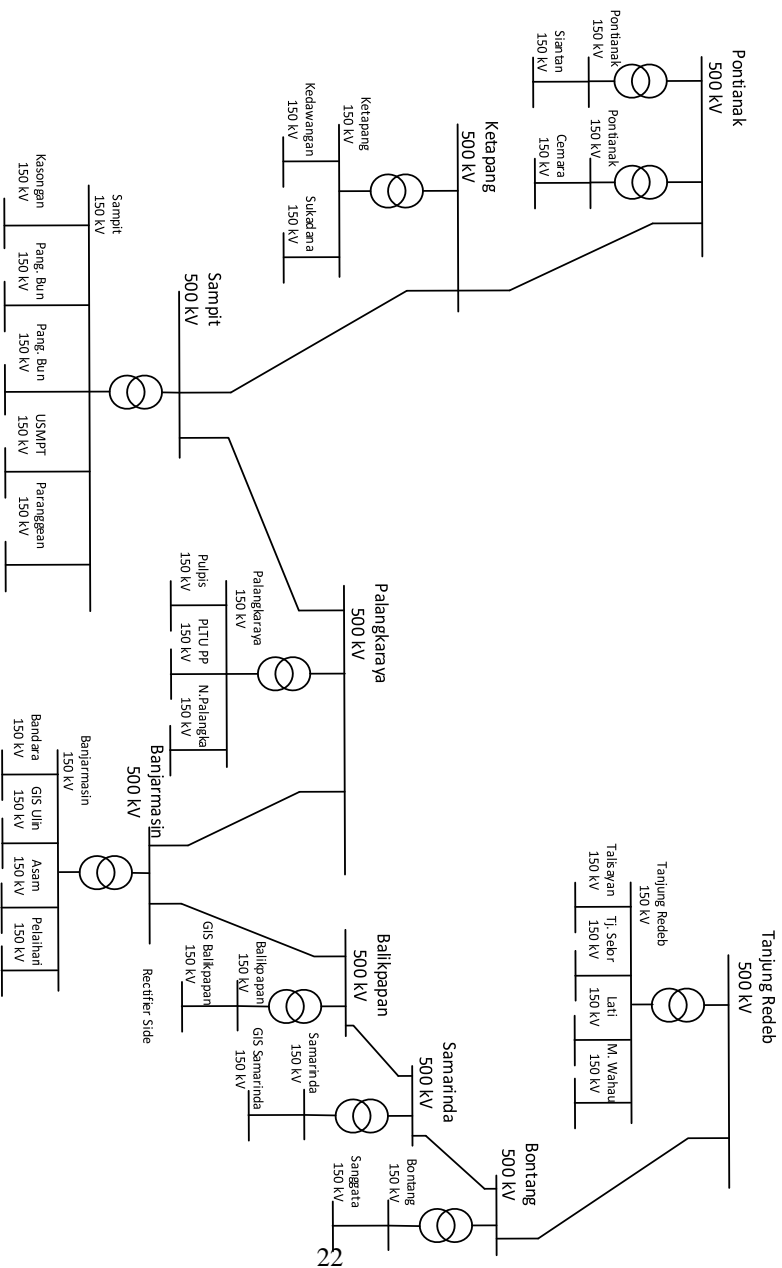
## **BAB 3**

### **PERENCANAAN SISTEM KELISTRIKAN KALIMANTAN**

Pada bab ini akan dijelaskan tentang perencanaan sistem kelistrikan Kalimantan yang saling terinterkoneksi dengan *backbone* 500 kV AC dan mengirimkan daya ke Jawa menggunakan sistem transmisi *high voltage direct current* dimana pada sistem kelistrikan Kalimantan di asumsikan dibagi menjadi tiga area yaitu area Provinsi Kalimantan Barat (Kalbar), Provinsi Kalimantan Selatan dan Kalimantan Tengah (Kalselteng), dan Provinsi Kalimantan Timur dan Kalimantan Utara (Kaltimra). Pada ketiga area yang terpisah ini masih menggunakan tegangan 150 kV untuk transmisinya. Sehingga dilakukan perencanaan untuk menghubungkan ketiga area ini dengan menggunakan tegangan 500 kV sebagai *backbone*, sehingga ketiga area saling terhubung satu sama lain.

#### **3.1 Sistem Kelistrikan Kalimantan dengan *Backbone* 500 kV AC**

Seperti dijelaskan sebelumnya pada perencanaan sistem kelistrikan Kalimantan di asumsikan dibagi menjadi tiga area yaitu area Kalbar, Kalselteng, dan Kaltimra. Tegangan 500 kV AC digunakan sebagai *backbone* untuk menghubungkan ketiga area yaitu Kalbar (Pontianak, Ketapang), Kalselteng (Sampit, Palangkaraya, Banjarmasin), dan Kaltimra (Balikpapan, Samarinda, Bontang, Tanjung Redeb).



**Gambar 3. 1 Sketsa Sistem Kelistrikan Kalimantan AC 500 kV AC**



### 3.1.1 Data Sistem Kelistrikan Kalimantan Backbone 500 kV AC

Pada Subbab Ini akan di berikan data tentang peralatan pada perencanaan sistem kelistrikan Kalimantan seperti berikut :

**Tabel 3. 1** Data Kabel Sistem Kelistrikan Kalimantan 500 kV AC

| Dari                | Menuju               | Line | Panjang (km) | Jenis Kabel |
|---------------------|----------------------|------|--------------|-------------|
| Pontianak 500 kV    | Ketapang 500 kV      | 2    | 230          | Dove 500 kV |
| Ketapang 500 kV     | Sampit 500 kV        | 2    | 287          | Dove 500 kV |
| Sampit 500 kV       | Palangkaraya 500 kV  | 2    | 110          | Dove 500 kV |
| Palangkaraya 500 kV | Banjarmasin 500 kV   | 2    | 180          | Dove 500 kV |
| Banjarmasin 500 kV  | Balikpapan 500 kV    | 2    | 370          | Dove 500 kV |
| Balikpapan 500 kV   | Samarinda 500 kV     | 2    | 95           | Dove 500 kV |
| Samarinda 500 kV    | Bontang 500 kV       | 2    | 85           | Dove 500 kV |
| Bontang 500 kV      | Tanjung Redeb 500 kV | 2    | 280          | Dove 500 kV |

**Tabel 3. 2** Data Transformer Sistem Kelistrikan Kalimantan 500 kV AC

| Bus                 | Tegangan (kV) | Kapasitas (MVA) | %Z   |
|---------------------|---------------|-----------------|------|
| Pontianak 500 kV    | 500/150       | 500             | 12.5 |
| Ketapang 500 kV     | 500/150       | 500             | 12.5 |
| Sampit 500 kV       | 500/150       | 500             | 12.5 |
| Palangkaraya 500 kV | 500/150       | 500             | 12.5 |
| Banjarmasin 500 kV  | 500/150       | 1000            | 12.5 |
| Balikpapan 500 kV   | 500/150       | 500             | 12.5 |

**Tabel 3. 2 (Lanjutan) Data Transformer Sistem Kelistrikan Kalimantan 500 kV AC**

| Bus                  | Tegangan (kV) | Kapasitas (MVA) | %Z   |
|----------------------|---------------|-----------------|------|
| Samarinda 500 kV     | 500/150       | 1500            | 12.5 |
| Bontang 500 kV       | 500/150       | 500             | 12.5 |
| Tanjung Redeb 500 kV | 500/150       | 500             | 12.5 |

### 3.1.2 Data Kelistrikan Kalimantan Barat

Pada Subbab ini akan dibahas tentang sistem kelistrikan Kalimantan Barat dimana Kalimantan Barat diwakilkan oleh dua bus 500 kV yaitu pada Pontianak 500 kV dan Ketapang 500 kV dimana beban diasumsikan berada pada level tegangan 150 kV. Pada Subbab ini akan ditampilkan data beban hingga tahun 2050 serta data pembangkit dan penambahan pembangkit pada sistem kelistrikan Kalimantan Barat :

**Tabel 3. 3 Data Beban Kelistrikan Kalimantan Barat**

|             | Beban (MW) |       |        |        |        |        |        |        |
|-------------|------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Tahun       | 2023       | 2026  | 2029   | 2032   | 2035   | 2040   | 2045   | 2050   |
| Nama        |            |       |        |        |        |        |        |        |
| Sei Raya    | 135,67     | 163,1 | 188,37 | 234,71 | 268,02 | 327,41 | 394,15 | 469,77 |
| Cemara      | 51,53      | 57,80 | 64,45  | 72,36  | 81,38  | 96,93  | 113,77 | 132,21 |
| Kota Baru   | 47,68      | 63,28 | 83,49  | 103,26 | 123,45 | 162,78 | 211,53 | 272,13 |
| Siantan     | 69,00      | 85,57 | 104,98 | 141,24 | 172,33 | 235,08 | 316,01 | 420,59 |
| Rasau       | 25         | 25    | 25     | 25     | 25     | 25     | 25     | 25     |
| Parit baru  | 34,50      | 48,02 | 62,17  | 91,14  | 107,78 | 139,57 | 178,12 | 225,06 |
| Senggiring  | 31,78      | 33,53 | 34,82  | 45,10  | 47,54  | 50,81  | 53,51  | 55,80  |
| Singkawang  | 58,66      | 75,06 | 91,80  | 117,49 | 138,56 | 178,61 | 226,90 | 285,36 |
| Sambas      | 33,86      | 41,37 | 49,55  | 58,29  | 67,86  | 83,74  | 100,39 | 118,12 |
| Semparuk    | 12,21      | 16,21 | 21,39  | 26,07  | 30,51  | 38,82  | 48,67  | 60,42  |
| Sanggau     | 29,84      | 44,18 | 61,77  | 93,45  | 109,08 | 138,24 | 172,64 | 213,45 |
| Entikong    | 7,40       | 9,82  | 12,96  | 15,82  | 18,54  | 23,65  | 29,73  | 37,01  |
| Sekadau     | 13,07      | 17,34 | 22,88  | 28,43  | 34,23  | 45,68  | 60,07  | 78,21  |
| Kota Baru 2 | 6,68       | 8,86  | 11,70  | 14,32  | 16,86  | 21,67  | 27,45  | 34,42  |
| Nanga Pinoh | 13,58      | 16,62 | 19,96  | 23,52  | 27,44  | 33,98  | 40,88  | 48,28  |
| Sintang     | 22,14      | 36,25 | 53,54  | 92,98  | 110,36 | 143,80 | 184,65 | 234,74 |
| Putussibau  | 12,75      | 15,60 | 18,72  | 22,06  | 25,73  | 31,85  | 38,29  | 45,19  |
| Tayan       | 18,69      | 24,81 | 32,73  | 41,07  | 50,16  | 68,55  | 92,31  | 123,08 |
| Ngabang     | 11,42      | 14,00 | 16,83  | 19,86  | 23,20  | 28,80  | 34,72  | 41,09  |

**Tabel 3. 3** (Lanjutan) Data Beban Sistem Kelistrikan Kalimantan Barat

| Tahun       | Beban (MW) |       |       |       |        |        |        |        |
|-------------|------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
|             | 2023       | 2026  | 2029  | 2032  | 2035   | 2040   | 2045   | 2050   |
| Nama        |            |       |       |       |        |        |        |        |
| Bengkayang  | 11,69      | 15,52 | 20,47 | 25,93 | 32,13  | 44,96  | 62,01  | 84,68  |
| Ketapang    | 16,02      | 27,73 | 40,55 | 90,30 | 105,43 | 130,72 | 157,46 | 186,17 |
| Sukadana    | 13,47      | 17,88 | 23,59 | 28,49 | 32,86  | 40,82  | 49,98  | 60,58  |
| Sandai      | 5,39       | 7,15  | 9,44  | 11,39 | 13,14  | 16,33  | 19,99  | 24,23  |
| Kendawangan | 5,30       | 7,04  | 9,29  | 11,49 | 13,73  | 18,11  | 23,53  | 30,27  |
| Air Upas    | 25         | 25    | 25    | 25    | 25     | 25     | 25     | 25     |

Pada tabel dibawah ini akan ditampilkan data tentang pembangkitan pada sistem kelistrikan Kalimantan Barat dimana dibagi menjadi tiga yaitu pembangkitan terpasang, rencana pembangkitan tetap dan rencana pembangkitan variabel, rencana pembangkitan tetap adalah pembangkitan yang sudah berada dalam proses konstruksi berdasarkan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2017-2026 dan rencana pembangkitan variabel adalah rencana pembangkitan yang belum tetap.

Total kapasitas terpasang adalah sekitar 480 MW dengan perincian seperti pada tabel berikut :

**Tabel 3. 4** Data Pembangkitan Terpasang Kalimantan Barat

| Jenis | Nama               | Unit     | Kapasitas (MW) |
|-------|--------------------|----------|----------------|
| PLTU  | Parit Baru (FTP 1) | #1       | 1 x 50         |
| PLTG  | MPP Kalbar         | #1,2,3,4 | 4 x 25         |
| PLTG  | Kalbar Peaker      | #1,2,3,4 | 4 x 25         |
| INT   | Serawak            | -        | 230            |
| Total |                    |          | 480            |

Beberapa unit pembangkit dalam tahap konstruksi dan beberapa lagi direncanakan untuk dimasukkan dalam sistem. Pembangkit-pembangkit tersebut adalah seperti dalam tabel berikut.

**Tabel 3. 5** Data Penambahan Pembangkitan Tetap Kalimantan Barat

| Jenis | Nama               | Unit | Kapasitas (MW) |
|-------|--------------------|------|----------------|
| PLTU  | Kalbar 1           | #1,2 | 2 x 100        |
| PLTU  | Parit Baru (FTP 2) | #1,2 | 2 x 55         |
| PLTU  | Parit Baru (FTP 1) | #1   | 1 x 50         |
| PLTU  | Pantai Kura-Kura   | #1,2 | 2 x 27.5       |
| Total |                    |      | 415            |

**Tabel 3. 6** Data Penambahan Pembangkit Variable Kalimantan Barat

| Jenis | Nama     | Unit       | Kapasitas (MW) |
|-------|----------|------------|----------------|
| PLTU  | Kalbar 2 | #1,2       | 2 x 100        |
| PLTU  | Kalbar 3 | #1,2       | 2 x 100        |
| PLTU  | Kalbar 4 | #1,2       | 2 x 100        |
| PLTG  | Kalbar 2 | #1,2,3,4,5 | 5 x 50         |
| Total |          |            | 850            |

### 3.1.3 Data Kelistrikan Kalimantan Selatan dan Tengah

Pada Subbab ini akan dibahas tentang sistem kelistrikan Kalimantan barat dimana Kalimantan Barat diwakilkan oleh tiga bus 500 kV yaitu pada Sampit 500 kV dan Palangkaraya 500 kV dan Banjarmasin 500 kV dimana beban diasumsikan berada pada level tegangan 150 kV dan beberapa pada 70 kV. Pada Subbab ini akan ditampilkan data beban hingga tahun 2050 serta data pembangkit dan penambahan pembangkit pada sistem kelistrikan Kalimantan Selatan dan Tengah :

**Tabel 3. 7** Data Beban Sistem Kelistrikan Kalimantan Selatan dan Tengah

| Tahun        | Beban (MW)   |       |       |        |        |        |        |        |
|--------------|--------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
|              | 2023         | 2026  | 2029  | 2032   | 2035   | 2040   | 2045   | 2050   |
| Nama GI      | Sampit       |       |       |        |        |        |        |        |
| Sukamara     | 5,40         | 6,32  | 7,29  | 8,30   | 9,89   | 11,60  | 12,81  | 5,40   |
| Nanga Bulik  | 7,62         | 8,93  | 10,33 | 11,77  | 12,75  | 13,59  | 14,46  | 7,62   |
| Pangk. Bun   | 30,16        | 37,57 | 46,00 | 55,44  | 74,25  | 97,79  | 128,64 | 30,16  |
| P. Banteng   | 9,70         | 11,42 | 13,23 | 15,07  | 18,40  | 22,08  | 26,46  | 9,70   |
| Kasongan     | 30,16        | 37,57 | 46,00 | 55,44  | 74,25  | 97,79  | 128,64 | 30,16  |
| Sampit       | 57,79        | 74,00 | 93,12 | 115,37 | 161,76 | 223,05 | 307,18 | 57,79  |
| K.Pambuang   | 6,26         | 7,29  | 8,37  | 9,47   | 10,27  | 10,94  | 11,64  | 6,26   |
| Paranggean   | 9,34         | 10,85 | 12,38 | 13,92  | 16,59  | 19,44  | 22,76  | 9,34   |
| Kuala Kurun  | 6,27         | 7,28  | 8,34  | 9,42   | 11,22  | 13,27  | 17,03  | 6,27   |
| Puruk Cahu   | 8,53         | 10,08 | 11,75 | 13,50  | 16,47  | 19,77  | 23,70  | 8,53   |
| Taweh        | 17,16        | 20,02 | 23,03 | 26,13  | 31,88  | 38,26  | 45,86  | 17,16  |
| Buntok       | 19,34        | 22,71 | 26,30 | 30,03  | 38,40  | 48,28  | 60,64  | 19,34  |
|              | Palangkaraya |       |       |        |        |        |        |        |
| Palangkaraya | 6,68         | 8,86  | 11,70 | 14,32  | 16,86  | 21,67  | 27,45  | 34,42  |
| Pulpis       | 13,58        | 16,62 | 19,96 | 23,52  | 27,44  | 33,98  | 40,88  | 48,28  |
| Selat        | 22,14        | 36,25 | 53,54 | 92,98  | 110,36 | 143,80 | 184,65 | 234,74 |
| Palangkaraya | 12,75        | 15,60 | 18,72 | 22,06  | 25,73  | 31,85  | 38,29  | 45,19  |

**Tabel 3.7** (Lanjutan) Data Beban Sistem Kelistrikan Kalimantan Selatan dan Tengah

| Tahun        | Beban (MW)  |        |        |       |       |       |       |        |
|--------------|-------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|
|              | 2023        | 2026   | 2029   | 2032  | 2035  | 2040  | 2045  | 2050   |
| Nama GI      | Banjarmasin |        |        |       |       |       |       |        |
| Amuntai      | 37,64       | 46,23  | 55,82  | 66,35 | 86,84 | 111,7 | 143,6 | 37,64  |
| Aranio       | 4,25        | 4,66   | 5,03   | 5,34  | 5,78  | 6,16  | 6,56  | 4,25   |
| Asam         | 21,39       | 25,92  | 30,86  | 36,17 | 46,25 | 58,17 | 73,05 | 21,39  |
| Bandara      | 41,02       | 52,52  | 66,09  | 81,88 | 114,8 | 158,3 | 218,0 | 41,02  |
| Barikin      | 45,54       | 54,40  | 63,87  | 73,84 | 92,24 | 113,3 | 139,0 | 45,54  |
| Bati         | 31,12       | 38,76  | 47,45  | 57,19 | 76,59 | 100,8 | 132,6 | 31,12  |
| Batulicin    | 55,57       | 71,15  | 89,55  | 110,9 | 155,5 | 214,4 | 295,3 | 55,57  |
| Cempaka      | 122,12      | 157,99 | 198,82 | 246,3 | 345,3 | 476,2 | 655,8 | 122,12 |
| Cempaka 70   | 4,47        | 3,86   | 4,65   | 5,53  | 7,24  | 9,32  | 11,98 | 4,47   |
| GIS Ulin     | 99,87       | 126,13 | 156,57 | 191,3 | 262,1 | 353,3 | 475,6 | 99,87  |
| Kadangan     | 19,38       | 23,47  | 27,95  | 32,77 | 41,90 | 52,69 | 66,17 | 19,38  |
| Kayutangi    | 23,62       | 29,43  | 36,03  | 43,42 | 58,15 | 76,59 | 100,7 | 23,62  |
| Kotabaru     | 24,34       | 28,95  | 33,95  | 39,26 | 47,91 | 57,49 | 68,91 | 24,34  |
| Mantul       | 59,85       | 76,63  | 96,44  | 119,4 | 167,5 | 231,0 | 318,1 | 59,85  |
| Marabahan    | 11,71       | 13,79  | 15,97  | 18,20 | 22,21 | 26,65 | 31,94 | 11,71  |
| Paringin     | 23,27       | 28,19  | 33,57  | 39,35 | 50,31 | 63,27 | 79,46 | 23,27  |
| Pelaihari    | 40,78       | 51,51  | 63,94  | 78,13 | 107,0 | 144,3 | 194,2 | 40,78  |
| Rantau       | 51,28       | 64,76  | 80,38  | 98,22 | 134,6 | 181,4 | 244,1 | 51,28  |
| Satui        | 25,36       | 30,72  | 36,58  | 42,88 | 54,83 | 68,94 | 86,59 | 25,36  |
| Sebar        | 18,03       | 21,54  | 25,29  | 29,24 | 36,53 | 44,87 | 55,06 | 18,03  |
| Sei Tabuk    | 24,79       | 30,45  | 36,77  | 43,71 | 57,20 | 73,61 | 94,62 | 24,79  |
| Tamiang      | 6,71        | 8,01   | 9,41   | 10,88 | 13,59 | 16,69 | 20,48 | 6,71   |
| Tanjung      | 48,65       | 61,44  | 76,26  | 93,19 | 127,7 | 172,1 | 231,6 | 48,65  |
| Trisakti 150 | 119,36      | 155,59 | 193,14 | 236,0 | 323,4 | 435,8 | 586,7 | 119,36 |
| Trisakti 70  | 12,80       | 11,32  | 14,05  | 17,17 | 23,53 | 31,71 | 42,68 | 12,80  |

Pada tabel dibawah ini akan ditampilkan data tentang pembangkitan pada sistem kelistrikan Kalimantan Selatan dan Tengah dimana dibagi menjadi tiga yaitu pembangkitan terpasang, rencana pembangkitan tetap dan rencana pembangkitan variabel, rencana pembangkitan tetap adalah pembangkitan yang sudah berada dalam proses konstruksi berdasarkan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2017-2026 dan rencana pembangkitan variabel adalah rencana pembangkitan yang belum tetap.

Total kapasitas terpasang adalah sekitar 640 MW dengan perincian seperti pada tabel berikut :

**Tabel 3. 8** Data Pembangkitan Terpasang Sistem Kelistrikan Kalimantan Selatan dan Tengah

| Jenis | Nama         | Unit  | Kapasitas (MW) |
|-------|--------------|-------|----------------|
| PLTU  | Asam-Asam    | #1,2  | 2 x 65         |
| PLTU  | Asam-Asam    | #3,4  | 2 x 65         |
| PLTU  | Pulang Pisau | #1,2  | 2 x 65         |
| PLTMG | Bangkanai    | #1-16 | 16 x 10        |
| PLTA  | Riam Kanan   | #1    | 90             |
| Total |              |       | 640            |

Beberapa unit pembangkit dalam tahap konstruksi dan beberapa lagi direncanakan untuk dimasukkan dalam sistem. Pembangkit-pembangkit tersebut adalah seperti dalam tabel berikut.

**Tabel 3. 9** Data Penambahan Pembangkitan Tetap Sistem Kelistrikan Kalimantan Selatan dan Tengah

| Jenis | Nama           | Unit  | Kapasitas (MW) |
|-------|----------------|-------|----------------|
| PLTU  | Kalsel (FTP 2) | #1,2  | 2 x 100        |
| PLTU  | Kalselteng 2   | #1,2  | 2 x 100        |
| PLTU  | Kalselteng 1   | #1,2  | 2 x 100        |
| PLTU  | Sampit         | #1,2  | 2 x 25         |
| PLTMG | Bangkanai 2    | #1-15 | 15 x 9         |
| Total |                |       | 785            |

**Tabel 3. 10** Data Penambahan Pembangkit Variable Sistel Kelistrikan Kalimantan Selatan dan Tengah

| Jenis | Nama           | Unit     | Kapasitas (MW) |
|-------|----------------|----------|----------------|
| PLTU  | Kalselteng 3   | #1,2     | 2 x 100        |
| PLTU  | Kalselteng 4   | #1,2     | 2 x 100        |
| PLTU  | Kalselteng 5   | #1,2     | 2 x 100        |
| PLTGU | Kalsel Peaker1 | #1,2,3,4 | 4 x 50         |
| PLTGU | Kalsel 1       | #1,2     | 2 x 100        |
| PLTG  | Kalteng        | #1,2     | 2 x 50         |
| PLTA  | Kusan          | #1       | 65             |
| Total |                |          | 1.165          |

### 3.1.4 Data Kelistrikan Kalimantan Timur dan Utara

Pada Subbab ini akan dibahas tentang sistem kelistrikan Kalimantan Timur dan Utara diwakilkan oleh empat bus 500 kV yaitu pada Balikpapan 500 kV dan Samarinda 500 kV dan Bontang 500 kV dan Tanjung Redeb 500 kV dimana beban diasumsikan berada pada level tegangan 150 kV dan beberapa pada 70 kV. Pada Subbab ini akan ditampilkan data beban hingga tahun 2050 serta data pembangkit dan penambahan pembangkit pada sistem kelistrikan Kalimantan Timur dan Utara :

**Tabel 3. 11** Data Beban Sistem Kelsitrikan Kalimantan Timur dan Utara

|              | Beban (MW) |        |        |       |       |       |       |        |
|--------------|------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Tahun        | 2023       | 2026   | 2029   | 2032  | 2035  | 2040  | 2045  | 2050   |
| Nama GI      | Balikpapan |        |        |       |       |       |       |        |
| Manggar      | 67,80      | 83,80  | 102,70 | 125,3 | 152,3 | 206,0 | 273,4 | 357,70 |
| Karjo        | 48,10      | 58,10  | 69,50  | 82,80 | 98,20 | 127,7 | 162,8 | 204,60 |
| New BPP      | 45,10      | 57,70  | 73,10  | 92,20 | 115,9 | 165,7 | 232,5 | 321,60 |
| Balikpapan   | 27,80      | 35,60  | 45,10  | 56,90 | 71,50 | 102,2 | 143,4 | 198,40 |
| TLK BPP      | 15,20      | 18,80  | 23,20  | 28,50 | 34,90 | 47,60 | 63,80 | 84,20  |
| Sepaku       | 2,60       | 3,10   | 3,70   | 4,30  | 5,10  | 6,50  | 8,10  | 10,00  |
| Pentung      | 26,40      | 33,60  | 42,30  | 52,10 | 58,50 | 69,40 | 80,80 | 92,70  |
| Grogot       | 31,30      | 41,20  | 53,30  | 65,80 | 71,80 | 81,20 | 90,10 | 98,60  |
| Kuaro        | 7,40       | 9,50   | 12,00  | 15,10 | 19,00 | 27,20 | 38,20 | 52,80  |
| Komam        | 4,50       | 5,60   | 6,90   | 8,60  | 9,30  | 10,60 | 11,70 | 12,80  |
|              | Samarinda  |        |        |       |       |       |       |        |
| Samarinda    | 28,10      | 34,90  | 43,00  | 52,80 | 64,60 | 88,20 | 118,1 | 156,00 |
| N.Samarinada | 37,80      | 48,30  | 61,20  | 77,20 | 97,00 | 138,8 | 194,7 | 269,30 |
| Samberah     | 19,00      | 22,70  | 26,80  | 31,50 | 36,90 | 46,80 | 58,40 | 71,80  |
| Sambutan     | 36,20      | 45,70  | 57,10  | 71,00 | 88,10 | 123,1 | 168,7 | 228,10 |
| Sanga2       | 3,90       | 5,00   | 6,30   | 8,00  | 10,10 | 14,40 | 20,20 | 27,90  |
| Bukuan       | 24,80      | 30,00  | 36,10  | 43,20 | 51,50 | 67,50 | 86,70 | 109,80 |
| Haru         | 39,40      | 47,60  | 57,20  | 68,30 | 81,30 | 106,1 | 136,0 | 171,70 |
| Samboja      | 8,30       | 10,50  | 13,10  | 16,30 | 20,20 | 28,30 | 38,70 | 52,40  |
| Tengkawan    | 100,40     | 111,50 | 122,70 | 134,5 | 146,8 | 166,0 | 184,2 | 201,40 |
| Embalut      | 32,20      | 38,30  | 45,20  | 53,20 | 62,30 | 79,10 | 98,70 | 121,30 |
| Bukit Biru   | 42,70      | 54,50  | 69,10  | 87,20 | 109,6 | 156,7 | 219,9 | 304,10 |
| Kota Bangun  | 6,70       | 8,50   | 10,80  | 13,60 | 17,10 | 24,50 | 34,40 | 47,60  |
| K. Janggut   | 2,00       | 2,40   | 2,90   | 3,40  | 4,00  | 5,10  | 6,30  | 7,80   |
| Ujoh Bilang  |            | 4,30   | 4,90   | 5,50  | 6,20  | 7,40  | 8,60  | 9,80   |
| Senipah      | 13,50      | 17,00  | 21,30  | 26,50 | 32,80 | 45,90 | 62,90 | 85,00  |
| Melak        | 18,00      | 22,70  | 28,50  | 35,30 | 42,60 | 56,90 | 74,40 | 96,10  |

**Tabel 3. 11** (Lanjutan) Data Beban Sistem Kelistrikan Kalimantan Timur dan Utara

| Tahun         | Beban (MW) |       |       |       |       |       |       |        |
|---------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
|               | 2023       | 2026  | 2029  | 2032  | 2035  | 2040  | 2045  | 2050   |
| Bontang       |            |       |       |       |       |       |       |        |
| Bontang       | 31,80      | 41,30 | 53,30 | 68,40 | 87,40 | 128,7 | 185,8 | 264,50 |
| Sepaso        | 3,14       | 4,01  | 5,08  | 3,68  | 4,02  | 4,54  | 5,04  | 5,51   |
| Maloi         | 3,50       | 5,20  | 7,80  | 11,50 | 17,00 | 31,80 | 58,30 | 105,40 |
| B. Koala      | 13,40      | 17,10 | 21,70 | 27,40 | 34,40 | 49,20 | 69,10 | 95,50  |
| Sanggata      | 28,20      | 35,40 | 44,20 | 54,20 | 60,90 | 72,30 | 84,10 | 96,50  |
| Muara Wahau   | 4,60       | 5,70  | 7,20  | 5,20  | 5,70  | 6,40  | 7,10  | 7,80   |
| Tanjung Redeb |            |       |       |       |       |       |       |        |
| M. Bengkal    | 2,20       | 2,80  | 3,50  | 4,40  | 5,40  | 7,60  | 10,40 | 14,00  |
| Talisayan     | 4,60       | 5,70  | 7,20  | 5,20  | 5,70  | 6,40  | 7,10  | 7,80   |
| Tj.Redeb      | 2,60       | 2,92  | 3,28  | 3,69  | 4,16  | 5,06  | 5,97  | 6,40   |
| Lati          | 41,17      | 52,00 | 65,99 | 83,83 | 106,2 | 157,7 | 227,0 | 296,87 |
| Tj. Batu      | 5,84       | 7,05  | 8,52  | 10,29 | 12,43 | 17,03 | 22,63 | 27,31  |
| Tj. Selor     | 1,00       | 1,20  | 1,50  | 1,90  | 2,30  | 3,10  | 4,20  | 5,60   |
| Sekatak       | 19,74      | 26,84 | 36,34 | 47,83 | 61,75 | 94,52 | 140,3 | 189,22 |
| Tidung Pale   | 3,59       | 4,30  | 4,85  | 5,47  | 6,56  | 8,86  | 11,61 | 13,81  |
| Malinau       | 3,04       | 3,88  | 4,96  | 6,38  | 8,19  | 12,42 | 18,28 | 24,42  |
| Sebuku        | 15,46      | 20,13 | 26,14 | 34,22 | 44,94 | 70,76 | 108,0 | 149,92 |
| Nunukan       | 1,05       | 1,22  | 1,41  | 1,63  | 1,89  | 2,41  | 2,98  | 3,35   |

Pada tabel dibawah ini akan ditampilkan data tentang pembangkitan pada sistem kelistrikan Kalimantan Selatan dan Tengah dimana dibagi menjadi tiga yaitu pembangkitan terpasang, rencana pembangkitan tetap dan rencana pembangkitan variabel, rencana pembangkitan tetap adalah pembangkitan yang sudah berada dalam proses konstruksi berdasarkan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2017-2026 dan rencana pembangkitan variabel adalah rencana pembangkitan yang belum tetap.

Total kapasitas terpasang adalah sekitar 768 MW dengan perincian seperti pada tabel berikut :

**Tabel 3. 12** Data Pembangkitan Terpasang Sistem Kelistrikan Kalimantan Timur dan Utara

| Jenis | Nama             | Unit | Kapasitas (MW) |
|-------|------------------|------|----------------|
| PLTU  | Teluk Balikpapan | #1,2 | 2 x 50         |
| PLTU  | Embalut Ekspansi | #3   | 1 x 50         |
| PLTU  | Embalut          | #1,2 | 2 x 25         |
| PLTU  | Kaltim (MT)      | #1   | 1 x 27,5       |
| PLTMG | MPP Kaltim       | #1-4 | 4 x 10         |



**Tabel 3. 12** (Lanjutan) Data Pembangkitan Terpasang Sistem Kelistrikan Kalimantan Timur dan Utara

| Jenis | Nama           | Unit | Kapasitas (MW) |
|-------|----------------|------|----------------|
| PLTGU | Tanjung Batu   | #1   | 60             |
| PLTG  | Senipah        | #1,2 | 2 x 40         |
| PLTG  | Kaltim Peaking | #1,2 | 2 x 80         |
| PLTG  | Sambera        | #1,2 | 2 x 20         |
| PLTD  | Cogindo        | #1-4 | 4 x 10         |
| Total |                |      | 767.5          |

Beberapa unit pembangkit dalam tahap konstruksi dan beberapa lagi direncanakan untuk dimasukkan dalam sistem. Pembangkit-pembangkit tersebut adalah seperti dalam tabel berikut

**Tabel 3. 13** Data Penambahan Pembangkit Tetap Sistem Kelistrikan Kalimantan Timur dan Utara

| Jenis | Nama            | Unit | Kapasitas (MW) |
|-------|-----------------|------|----------------|
| PLTU  | Kaltim 4        | #1,2 | 2 x 100        |
| PLTU  | Kaltim (FTP 2)  | #1,2 | 2 x 100        |
| PLTU  | Kaltim 5 (MT)   | #1,2 | 2 x 100        |
| PLTU  | Kaltim (MT)     | #2   | 1 x 27.5       |
| PLTGU | Senipah         | #1   | 1 x 36         |
| PLTG  | Kaltim Peaker 2 | #1-5 | 5 x 50         |
| Total |                 |      | 913.5          |

**Tabel 3. 14** Data Penambahan Pembangkit Variable Sistem Kelistrikan Kalimantan Timur dan Utara

| Jenis | Nama            | Unit | Kapasitas (MW) |
|-------|-----------------|------|----------------|
| PLTU  | Kaltimra (MT)   | #1,2 | 2 x 200        |
| PLTU  | Kaltim 3 (MT)   | #1,2 | 2 x 100        |
| PLTU  | Kaltim 6 (MT)   | #1,2 | 2 x 100        |
| PLTA  | Kelai           | -    | 55             |
| PLTA  | Tabang          | -    | 360            |
| PLTA  | Kaltara/Kayan 1 | -    | 660            |
| Total |                 |      | 1875           |

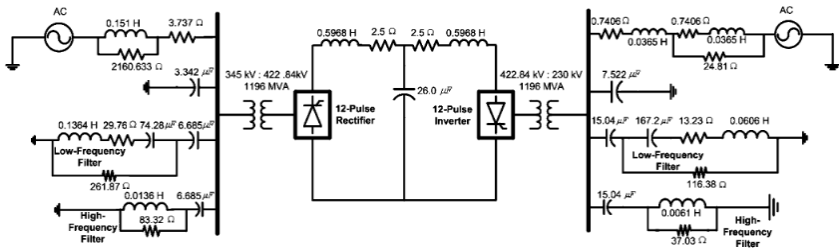
### **3.2 Sistem Kelistrikan Kalimantan 500 kV AC dan Transmisi HVDC Menuju Jawa**

Pada subbab sebelumnya telah di jelaskan mengenai sistem interkoneksi Kalimantan menggunakan *backbone* 500 kV AC, pada subbab ini akan dijelaskan mengenai skenario transfer daya menuju ke Jawa menggunakan sistem transmisi HVDC 500 kV. Pada skenario ini di asumsikan potensi tenaga air pada aliran sungai Kayan dimana sebesar 6000 MW berdasarkan RUPTL [3] dimanfaatkan secara besar dengan adanya penambahan pembangkit Kayan Hydro sebesar 5 x 400 MW yang terhubung dengan bus Tanjung Redeb 500 kV sehingga dengan adanya skenario pemanfaatan potensi energi air ini diperlukan beban yang perlu di suplai sehingga direncanakan transfer daya listrik menuju Jawa menggunakan transmisi HVDC. Pada skenario ini letak HVDC adalah pada bus Banjarmasin 500 kV yang menuju Jawa yang diasumsikan berupa beban dengan jarak 500 km.



### 3.2.1 Sistem Transmisi HVDC Menuju Jawa

Pada subbab ini akan dijelaskan mengenai sistem transmisi menuju Jawa, sistem transmisi HVDC yang digunakan adalah sistem dengan topologi *monopolar* dimana hanya aliran daya hanya menuju satu tempat yaitu menuju Jawa pada pemodelan sistem transmisi HVDC *monopolar* ini mengacu pada *CIGRE HVDC Benchmark model* [4] dengan pemodelan sebagai berikut :



**Gambar 3. 3** *CIGRE HVDC Benchmark Model*

Komponen pada sistem transmisi HVDC diatas mengacu pada *CIGRE HVDC benchmark model* adalah sebagai berikut:

- Rectifier 12 Pulsa**  
Rectifier 12 pulsa adalah komponen utama pada sistem transmisi HVDC sebagai penyerah atau pengubah dari AC menjadi DC pada model ini menggunakan rectifier dengan thyristor sebagai pengatur *swithing* untuk mengubah tegangan AC menjadi DC
- Inverter 12 Pulsa**  
Inverter 12 pulsa merupakan komponen utama pada sistem transmisi HVDC sebagai peralatan yang mengubah kembali tegangan DC menjadi AC.
- Smoothing reactor**  
Pada model diberikan *smoothing reactor* dengan besar total sama dengan 1.0 H. Reactor berfungsi untuk mencegah kegagalan komutasi pada inverter dan mengurangi harmonisa pada line DC.

- d. Sumber daya reaktif  
Konverter HVDC membutuhkan daya reaktif untuk mengubah daya, daya reaktif yang dibutuhkan sekitar 60% dari daya aktif yang di transfer. Sumber daya reaktif berasal dari filter harmonisa pada model terdapat dua filter yaitu *high frequency filter* dan *low frequency filter* yang berfungsi sebagai filter harmonisa dan sumber daya reaktif

### 3.2.2 Data Peralatan Sistem Transmisi HVDC

Pada pemodelan sistem transmisi HVDC digunakan pemodelan berdasarkan *HVDC Benchmark Model* dengan data peralatan sebagai berikut berdasarkan data tipikal dari DigSILENT PowerFactory dengan data sebagai berikut :

**Tabel 3. 15** Data Rectifier 6 Pulsa

| Rectifier 6 Pulsa      |             |
|------------------------|-------------|
| Rated AC Voltage       | 312,8548 kV |
| Rated DC Voltage       | 250 kV      |
| Rated Active Power     | 500 MW      |
| Rated DC Current       | 2 kA        |
| Nominal Turn Ratio     | 0,612586    |
| Nominal Firing Angle   | 15 deg      |
| Commutation Reactance  | 13,4445     |
| Control Characteristic | I           |

**Tabel 3. 16** Data Inverter 6 Pulsa

| Inverter 6 Pulsa       |            |
|------------------------|------------|
| Rated AC Voltage       | 208,5696kV |
| Rated DC Voltage       | 250 kV     |
| Rated Active Power     | 500 MW     |
| Rated DC Current       | 2 kA       |
| Nominal Turn Ratio     | 0,91888    |
| Nominal Firing Angle   | 15, deg    |
| Commutation Reactance  | 13,4445    |
| Control Characteristic | Vdc        |

### 3.3 Modal Analysis pada DIgSILENT Power Factory

Setelah dilakukan pemodelan pada *software* DigSILENT Power Factory selanjutnya dilakukan simulasi aliran daya untuk memastikan apakah sistem dalam keadaan stabil konvergen dan berjalan dengan baik. Setelah simulasi aliran daya telah berjalan dengan baik setelah itu *modal analysis* dapat dilakukan dengan menggunakan menu *modal analysis* yang tersedia pada *software* DIgSILENT Power Factory. *Modal analysis* membutuhkan model linier dari generator, pada tugas akhir ini DIgSILENT menggunakan pemodelan 6<sup>th</sup> order generator [5, 6] dengan persamaan sebagai berikut :

$$\Delta \dot{\delta} = \omega_0 \Delta \omega \quad (4.1)$$

$$\Delta \dot{\omega} = \frac{1}{2H} (\Delta T_m - \Delta T_e - K_D \Delta \omega_m) \quad (4.2)$$

$$\Delta \dot{\psi}_{fd} = \frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{fd}} \Delta \psi_{ad} - \frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{fd}} \Delta \psi_{fd} + \omega_0 \Delta e_{fd} \quad (4.3)$$

$$\Delta \dot{\psi}_{1d} = \frac{\omega_0 R_{1d}}{L_{1d}} \Delta \psi_{ad} - \frac{\omega_0 R_{1d}}{L_{1d}} \Delta \psi_{1d} \quad (4.4)$$

$$\Delta \dot{\psi}_{1q} = \frac{\omega_0 R_{1q}}{L_{1q}} \Delta \psi_{1q} - \frac{\omega_0 R_{1q}}{L_{1q}} \Delta \psi_{aq} \quad (4.5)$$

$$\Delta \dot{\psi}_{2q} = \frac{\omega_0 R_{2q}}{L_{2q}} \Delta \psi_{2q} - \frac{\omega_0 R_{1q}}{L_{1q}} \Delta \psi_{aq} \quad (4.6)$$

Keterangan :

|                  |   |
|------------------|---|
| $\omega_0$       | Kecepatan Sudut Rotor   |
| $H$              | Inersia   |
| $T_m$            | Torsi Mekanik   |
| $T_e$            | Torsi Elektrik  |
| $K_D$            | Koefisien Torsi Damping   |
| $L_{fd}$         | Field Winding Leakage Inductance  |
| $L_{1d}$         | Reaktansi d-axis amortisseur  |
| $L_{1q}, L_{2q}$ | 1 <sup>st</sup> dan 2 <sup>nd</sup> q-axis amortisseur resistance reactance |
| $e_{fd}$         | Tegangan Medan  |

$R_{1d}$  d-axis amortisseur resistance

$R_{1q}, R_{2q}$  1<sup>st</sup> dan 2<sup>nd</sup> q-axis amortisseur resistance

$\psi_{aq}, \Delta\psi_{ad}$  d and q-axis mutual flux linkages

$\dot{\psi}_{1d}$  d-axis amortisseur flux linkage

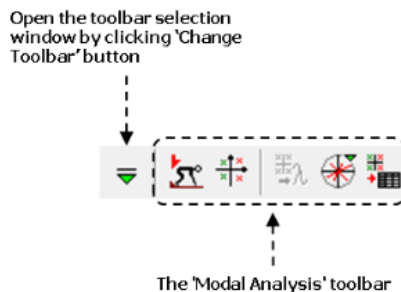
$\dot{\psi}_{1q}, \dot{\psi}_{2q}$  1<sup>st</sup> dan 2<sup>nd</sup> q-axis amortisseur flux linkage

### 3.3.1 Menggunakan Modal Analysis pada DIgSILENT Power Factory



Modal Analysis digunakan untuk mengkalkulasi nilai eigenvalue dan eigenvectors dari sistem multi-mesin. Perhitungan dari eigenvalue dapat dilakukan pada saat awal simulasi transien maupun saat telah di berhentikan. Modal Analysis biasa juga disebut dengan perhitungan eigenvalue, atau small signal stability analysis berikut langkah yang dilakukan untuk mendapatkan *eigenvalue* :


#### 3.3.1.1 Memulai Modal Analysis

Memilih toolbar Modal Analysis dengan memilih seperti pada gambar berikut

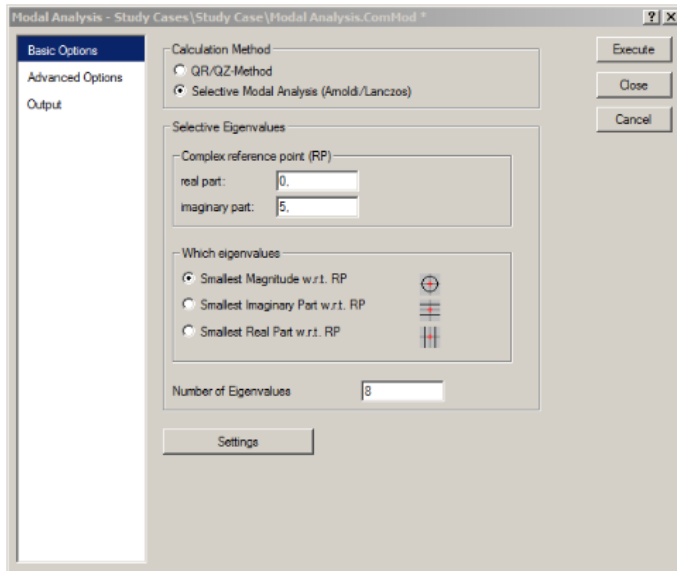


**Gambar 3. 4** Toolbar Modal Analysis

1. Calculate initial condition menggunakan tombol  lalu pilih tombol execute. Pada tahap ini nilai load flow harus konvergen.
2. Setelah *initial condition* telah dilakukan, selanjutnya klik  untuk melakukan perhitungan nilai *eigenvalue*.

3. Setelah perhitungan *eigenvalue* telah dilakukan kita dapat melihat hasil nilai-nilai *eigenvalue* dengan menggunakan tombol 

### 3.3.1.2 *Basic Command Pada Modal Analysis*



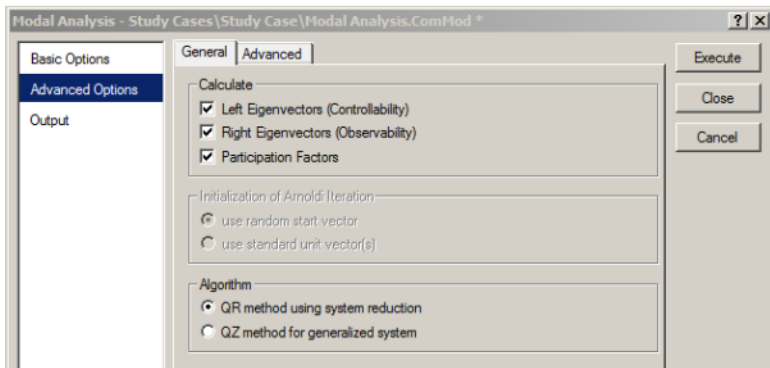
**Gambar 3. 5** *Basic Command Modal Analysis*

Pada menu ini dibagi menjadi dua metode perhitungan yaitu :

1. QR / QZ-Method : Metode ini adalah metode 'klasik' untuk menghitung semua *eigenvalue* sistem.
2. *Selective Modal Analysis* (Arnoldi / Lanczos); Metode ini hanya menghitung subset dari *eigenvalue* sistem di sekitar titik referensi tertentu. Seringkali metode ini digunakan dalam sistem yang sangat besar ketika menggunakan metode QR bisa sangat memakan waktu. Ini sangat berguna jika pengguna mengetahui area target yang diminati untuk *eigenvalue*



### 3.3.1.3 *Pengaturan Lanjutan*



**Gambar 3. 6** *Advance Option Modal Analysis*

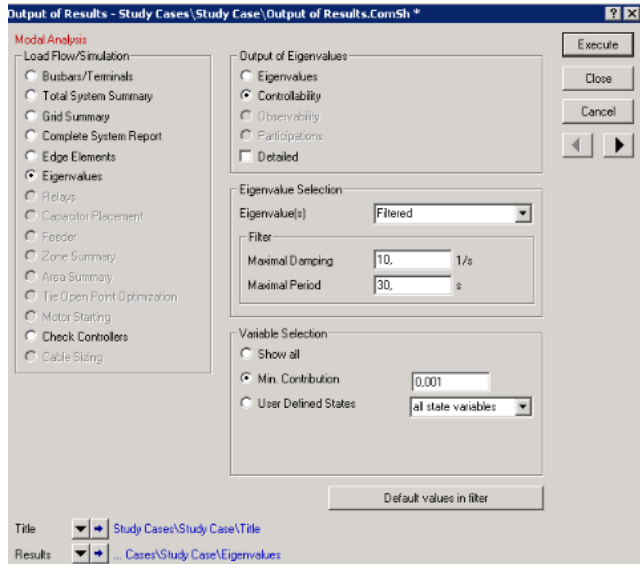
1. *Left Eigenvectors (Controllability)*; Jika opsi ini diaktifkan, perintah *Modal Analysis* akan hitung vektor Eigen Kiri. Ini diaktifkan secara default. Pengguna dapat memvisualisasikan Controllability untuk mode apa pun menggunakan Mode Phasor Plot atau Mode Bar Plot
2. *Right Eigenvectors (Observability)*; Jika opsi ini diaktifkan maka perintah *Modal Analysis* akan menghitung Eigenvectors Kanan (Pengamatan) untuk setiap variabel keadaan. Ini dinonaktifkan secara default. Pengguna dapat memvisualisasikan Observability untuk setiap mode baik dalam Mode Phasor Plot atau Mode Bar Plot
3. *Participation Factor* ; Jika opsi ini diaktifkan maka perintah *Modal Analysis* akan menghitung Faktor Partisipasi untuk setiap variabel keadaan. Ini dinonaktifkan secara default. Pengguna dapat memvisualisasikan Faktor Partisipasi untuk mode apa pun menggunakan Mode Phasor Plot atau Mode Bar Plot.

### 3.3.1.4 *Melihat Hasil Modal Analysis*

Ada beberapa cara bagi pengguna untuk melihat hasil perhitungan Modal Analisis, termasuk melalui laporan yang sudah ditetapkan ke Output Window, menggunakan plot built-in dalam PowerFactory atau menggunakan spreadsheet seperti browser data. Selain

itu, pengguna dapat mencari objek individu dalam database dan melihat Controllability, Observability, dan Partisipasi untuk mode tertentu dalam manajer data atau objek yang familiar.

1. Klik kiri pada ikon Output Calculation Analysis akan muncul dialog output result.
2. Pilih Eigenvalues, pada kolom output of eigenvalue pilih nilai yang ingin dilihat.
3. Setelah muncul pada kolom variable selection pilih nilai eigenvalue yang ini dilihat dan state variable yang ingin dilihat. Lalu tekan execute.



|     | Name       | Real part<br>1/s | Imaginary part<br>rad/s | Magnitude<br>1/s | Angle<br>deg | Damped Frequency<br>Hz | Period<br>s | Damping<br>1/s | Damping Ratio |
|-----|------------|------------------|-------------------------|------------------|--------------|------------------------|-------------|----------------|---------------|
| ► + | Mode 00001 | 0,               | 0,                      | 0,               | 0,           | 0,                     | 0,          | -0,            | 0,            |
| +   | Mode 00002 | 32867185144      | 0,                      | 32867185144      | 180,         | 0,                     | 0,          | 32867185144    | 1,            |
| +   | Mode 00003 | 32867185144      | 0,                      | 32867185144      | 180,         | 0,                     | 0,          | 32867185144    | 1,            |
| +   | Mode 00004 | 124995,3         | 0,                      | 124995,3         | 180,         | 0,                     | 0,          | 124995,3       | 1,            |
| +   | Mode 00005 | 124995,3         | 0,                      | 124995,3         | 180,         | 0,                     | 0,          | 124995,3       | 1,            |
| +   | Mode 00006 | 32867185144      | 0,                      | 32867185144      | 180,         | 0,                     | 0,          | 32867185144    | 1,            |
| +   | Mode 00007 | 32867185144      | 0,                      | 32867185144      | 180,         | 0,                     | 0,          | 32867185144    | 1,            |
| +   | Mode 00008 | 124995,3         | 0,                      | 124995,3         | 180,         | 0,                     | 0,          | 124995,3       | 1,            |
| +   | Mode 00009 | 124995,3         | 0,                      | 124995,3         | 180,         | 0,                     | 0,          | 124995,3       | 1,            |

Gambar 3. 7 Hasil Modal Analysis

## **BAB 4**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

#### **4.1 Pemodelan Sistem Kelistrikan Kalimantan**

Berdasarkan data-data yang ada dilakukan pemodelan dalam bentuk *single line diagram* dari sistem kelistrikan Kalimantan dalam software DigSILENT Power Factory. Pemodelan simulasi sistem kelistrikan menggunakan data-data yang telah di berikan pada bab sebelumnya dan data-data yang terlampir.

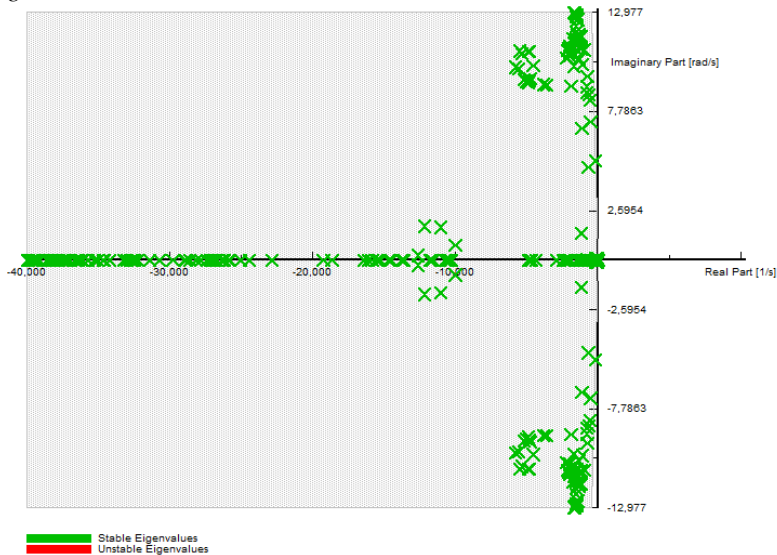
Pada Analisis ini akan dilakukan untuk tahun 2023-2035 setiap tiga tahun sekali dan dilanjutkan 2035-2050 setiap lima tahun sekali dengan menganalisis *eigenvalue* dengan *damping ratio* dibawah 5% karena dengan *damping ratio* dibawah 5% menunjukan kelemahan sistem karena memperpanjang waktu yang dibutuhkan untuk sitem kembali *steady state* dan jika gangguan lain terjadi selama waktu ini ada risiko yang lebih tinggi yang dapat menyebabkan ketidakstabilan[7, 8] .

#### **4.2 Modal analysis Kelistrikan Kalimantan Tahun 2023**

Pada tahun 2023 sistem Kelistrikan Kalimantan sudah saling terhubung atau terinterkoneksi dengan sistem *backbone* 500 kV. Pada tahun 2023 terdapat penambahan satu pembangkit PLTU 100 MW pada area Kalselteng dan Kalbar dengan data beban sesuai dengan data beban pada Bab 3.

#### 4.2.1 Eigenvalue Kelistrikan Kalimantan Tahun 2023

Modal analysis pada sistem kelistrikan Kalimantan pada tahun 2023 menghasilkan 699 nilai *eigenvalue* dimana seluruh nilai *eigenvalue* menunjukkan bahwa sistem stabil dikarenakan seluruh bagian *real* dari nilai *eigenvalue* bernilai negatif, berikut adalah plot seluruh nilai *eigenvalue*



**Gambar 4. 1** Plot *Eigenvalue* Kelistrikan Kalimantan Tahun 2023

Dari 699 nilai *eigenvalue* ditampilkan beberapa nilai *eigenvalue* dengan *damping ratio* dibawah 10% dan selanjutnya akan di analisis nilai *eigenvalue* dengan *damping ratio* 5% hal ini dilakukan karena dengan *damping ratio* dibawah 5 % waktu yang dibutuhkan sistem untuk kembali ke dalam kondisi *steady state* akan semakin lama sehingga jika terjadi gangguan lain pada saat sistem menuju *steady state* akan menyebabkan sistem beresiko tinggi untuk *breakdown*.

**Tabel 4. 1** *Eigenvalue* dengan Damping Dibawah 10% Tahun 2023

| Mode       | Real            | Imaginer       | Frequency      | Damping Ratio |
|------------|-----------------|----------------|----------------|---------------|
| <b>283</b> | <b>-0,18498</b> | <b>5,20882</b> | <b>0,82901</b> | <b>3,549%</b> |
| 242        | -0,54432        | 8,39660        | 1,33636        | 6,469%        |
| 238        | -0,62129        | 8,66842        | 1,37962        | 7,149%        |
| 256        | -0,52295        | 7,23764        | 1,15191        | 7,207%        |
| 224        | -0,73230        | 9,60987        | 1,52946        | 7,598%        |
| 182        | -0,93880        | 11,02553       | 1,75477        | 8,484%        |
| 234        | -0,79761        | 9,10870        | 1,44969        | 8,723%        |
| 236        | -0,79851        | 8,78369        | 1,39797        | 9,053%        |
| 186        | -1,17315        | 11,73096       | 1,86704        | 9,951%        |

Pada mode 283 dapat dilihat *damping ratio* sebesar 3,549% sehingga merupakan nilai *eigenvalue* yang kritis atau sudah mendekati sumbu positif sehingga perlu dilakukan analisis pembangkit mana saja yang berpengaruh pada *eigenvalue* ini.

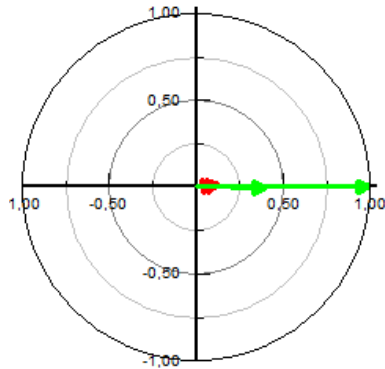
#### 4.2.2 Mode Shape *Eigenvalue* (Mode 283)

Pada subbab ini akan ditampilkan *mode shape* atau *observeability* pada mode dengan *damping ratio* dibawah 5 % dalam hal ini mode 283 memiliki *damping ratio* sebesar 3,549% dengan frekuensi 0,82901. Mode 283 memiliki *mode shape* atau *observeability* dimana dapat dilihat berdasarkan *observeability* sudut rotor ( $\delta$ ) dan *observeability* kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) sebagai berikut :

**Tabel 4. 2** *Observeability*  $\delta$  Mode 283

| <i>Observeability</i> $\delta$ |            |           |        |
|--------------------------------|------------|-----------|--------|
| Nama Pembangkit                | Area       | Magnitude | Angle  |
| Bangkanai                      | Kalselteng | 1         | 0      |
| Kalselteng 1                   | Kalselteng | 0,396     | -0,757 |
| Sampit                         | Kalselteng | 0,132     | 3,986  |

Dari data *observeability*  $\delta$  dilihat bahwa Bangkanai memiliki magnitude yang paling besar namun dengan frekuensi 0,82901 dimana belum dapat dilihat jenis osilasi elektromekanikal apakah merupakan *inter-area* atau lokal osilasi karena berdasarkan sudutnya ketiga pembangkit hampir satu fasa atau berhimpit dalam bentuk fasor dapat diperlihatkan sebagai berikut :



**Gambar 4. 2** Phasor Plot *Observeability*  $\delta$  Mode 283

Selain berdasarkan *observeability* sudut rotor ( $\delta$ ) dapat pula dilihat berdasarkan *observeability* kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) yang ditampilkan sebagai berikut :

**Tabel 4. 3** *Observeability*  $\omega$  Mode 283

| <i>Observeability</i> $\omega$ |            |           |         |
|--------------------------------|------------|-----------|---------|
| Nama Pembangkit                | Area       | Magnitude | Angle   |
| Kalselteng 1                   | Kalselteng | 0,004     | 89,419  |
| Bangkanai                      | Kalselteng | 0,015     | 91,567  |
| Kaltim Peaker                  | Kaltimra   | 0,002     | -83,733 |
| Kaltim 4                       | Kaltimra   | 0,002     | -84,711 |
| PLTU Kaltim MT                 | Kaltimra   | 0,002     | -84,858 |
| Senipah Steam                  | Kaltimra   | 0,002     | -85,121 |
| GT SNP                         | Kaltimra   | 0,004     | -85,140 |
| SMB                            | Kaltimra   | 0,002     | -91,777 |
| Cogindo                        | Kaltimra   | 0,002     | -92,197 |
| Embalut                        | Kaltimra   | 0,002     | -93,439 |

Berdasarkan *observeability*  $\omega$  dapat dilihat bahwa mode 283 merupakan mode *inter-area* karena melibatkan generator dari dua area yang berbeda. Dilihat dari sudutnya pembangkit pada area Kalselteng yaitu Kalselteng 1 dan bangkanai beresilasi terhadap pembangkit pada area Kaltimra sehingga dapat dikatakan mode 283 merupakan mode *inter-area* antara Kalselteng dengan Kaltimra.

#### 4.2.3 Participation Factor (Mode 283)

Pada subbab ini akan ditampilkan *participation factor* dari mode 283 untuk mengetahui *state variable* dan generator mana saja yang memiliki kontribusi terhadap nilai *eigenvalue* pada mode 283 dimana akan ditampilkan *participation factor*  $\delta$  dan *participation factor*  $\omega$  karena pada mode elektromekanikal erat kaitan dengan rotor sehingga *participation factor* terbesar berasal dari  $\delta$  dan  $\omega$ .

**Tabel 4. 4** *Participation factor*  $\delta$  Mode 283

| <i>Participation factor</i> $\delta$ |            |           |
|--------------------------------------|------------|-----------|
| Nama Pembangkit                      | Area       | Magnitude |
| Bangkanai                            | Kalselteng | 0,967     |
| Kalselteng 1                         | Kalselteng | 0,298     |

**Tabel 4. 5** *Participation factor*  $\omega$  Mode 283

| <i>Participation factor</i> $\omega$ |            |           |
|--------------------------------------|------------|-----------|
| Nama Pembangkit                      | Area       | Magnitude |
| Bangkanai                            | Kalselteng | 1         |
| Kalselteng 1                         | Kalselteng | 0,230     |

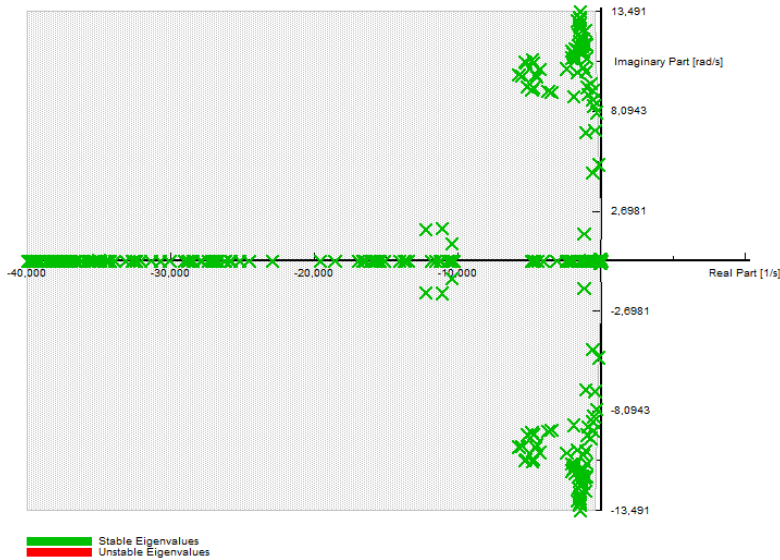
Tabel diatas menampilkan *participation factor* dari mode yang bersangkutan, dapat dilihat *participation factor* terbesar adalah berasal dari state yang berhubungan erat dengan rotor karenakan merupakan mode elektromekanikal, berdasarkan *participation factornya* dapat dilihat bahwa *eigenvalue* untuk mode 283 lebih sensitif terhadap generator pada area Kalselteng terutama pada pembangkit Bangkanai dan Kalselteng 1, dan jika dilihat dari *observeability* dan *participation factor* dimana generator Bangkanai lebih *observeable* dibandingkan dengan Kalselteng 1 maka pembangkit Bangkanai akan lebih rentan terhadap gangguan jika dibandingkan dengan Kalselteng 1.

### 4.3 Modal analysis Kelistrikan Kalimantan Tahun 2026

Pada tahun 2026 sistem Kelistrikan Kalimantan sudah saling terhubung atau terinterkoneksi dengan sistem *backbone* 500 kV. Pada tahun 2026 terdapat penambahan tiga pembangkit PLTG 100 MW dan PLTA Kusan pada area Kalselteng serta satu PLTU 100 MW pada area Kalbar dengan data beban sesuai dengan data beban.

#### 4.3.1 Eigenvalue Kelistrikan Kalimantan Tahun 2026

Modal analysis pada sistem kelistrikan Kalimantan pada tahun 2026 menghasilkan 765 nilai *eigenvalue* dimana seluruh nilai *eigenvalue* menunjukkan bahwa sistem stabil dikarenakan seluruh bagian *real* dari nilai *eigenvalue* bernilai negatif, berikut adalah plot seluruh nilai *eigenvalue*



**Gambar 4. 3** Plot *Eigenvalue* Kelistrikan Kalimantan Tahun 2026

Dari 765 nilai *eigenvalue* ditampilkan beberapa nilai *eigenvalue* dengan *damping ratio* dibawah 10% dan selanjutnya akan di analisis nilai *eigenvalue* dengan *damping ratio* 5% hal ini dilakukan karena dengan *damping ratio* dibawah 5 % waktu yang dibutuhkan sistem untuk kembali ke dalam kondisi *steady state* akan semakin lama sehingga jika terjadi gangguan lain pada saat sistem menuju *steady state* akan menyebabkan sistem beresiko tinggi untuk *breakdown*.



**Tabel 4. 6** *Eigenvalue* dengan Damping Dibawah 10% Tahun 2026

| Mode       | Real            | Imaginer       | Frequency      | Damping Ratio |
|------------|-----------------|----------------|----------------|---------------|
| <b>308</b> | <b>-0,18217</b> | <b>5,21143</b> | <b>0,82942</b> | <b>3,493%</b> |
| <b>280</b> | <b>-0,32155</b> | <b>8,02741</b> | <b>1,27760</b> | <b>4,002%</b> |
| 278        | -0,51807        | 8,39463        | 1,33605        | 6,160%        |
| 285        | -0,45179        | 7,04744        | 1,12163        | 6,398%        |
| 258        | -0,60227        | 9,20492        | 1,46501        | 6,529%        |
| 274        | -0,58968        | 8,69521        | 1,38388        | 6,766%        |
| 256        | -0,72901        | 9,58706        | 1,52583        | 7,582%        |
| 206        | -1,01407        | 11,68928       | 1,86041        | 8,643%        |
| 196        | -1,09653        | 12,46858       | 1,98444        | 8,761%        |

Pada tahun 2026 dapat dilihat terdapat dua nilai *eigenvalue* dengan *damping ratio* dibawah 5% sehingga merupakan nilai *eigenvalue* yang kritis atau sudah mendekati sumbu positif sehingga perlu dilakukan analisis pembangkit mana saja yang berpengaruh pada *eigenvalue* ini.

#### 4.3.2 Mode Shape *Eigenvalue* (Mode 308)

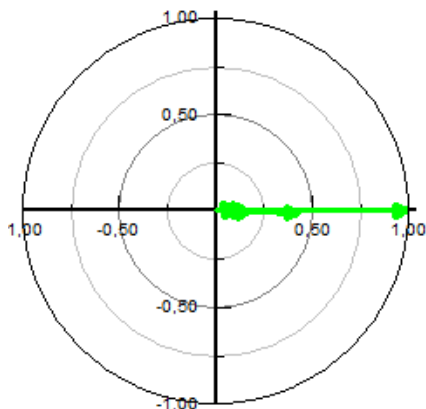
Pada mode 308 memiliki *damping ratio* sebesar 3,493% dengan frekuensi 0,82942. Mode 308 memiliki *mode shape* atau *observeability* dimana dapat dilihat berdasarkan *observeability* sudut rotor ( $\delta$ ) dan *observeability* kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) sebagai berikut :

**Tabel 4. 7** *Observeability*  $\delta$  Mode 308

| <i>Observeability</i> $\delta$ |            |           |        |
|--------------------------------|------------|-----------|--------|
| Nama Pembangkit                | Area       | Magnitude | Angle  |
| Bangkanai                      | Kalselteng | 1         | 0      |
| Kalselteng 1                   | Kalselteng | 0,429     | -1,306 |
| PLTG Kalteng                   | Kalselteng | 0,175     | -1,238 |
| Sampit                         | Kalselteng | 0,148     | 1,353  |

Dari data *observeability*  $\delta$  dilihat bahwa Bangkanai memiliki magnitude yang paling besar dari data *observeability* diatas dapat dilihat pula bahwa mode 308 memiliki *observeability* yang hampir sama dengan mode 283 pada tahun 2023 dikarenakan adanya penambahan pembangkit pada tahun 2026 yaitu PLTG Kalteng dimana lokasinya tidak jauh dari pembangkit Sampit sehingga PLTG Kalteng ikut memiliki magnitude *observeability* pada mode 308 namun dengan frekuensi 0,82942 dimana belum dapat dilihat jenis osilasi elektromekanikal apakah merupakan *inter-area* atau lokal osilasi karena berdasarkan sudutnya keempat

pembangkit hampir satu fasa atau berhimpit dalam bentuk fasor dapat diperlihatkan sebagai berikut :



**Gambar 4. 4** Phasor Plot *Observeability* δ Mode 308

Selain berdasarkan *observeability* sudut rotor ( $\delta$ ) dapat pula dilihat berdasarkan *observeability* kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) yang ditampilkan sebagai berikut :

**Tabel 4. 8** *Observeability*  $\omega$  Mode 308

| <i>Observeability</i> $\omega$ |            |           |         |
|--------------------------------|------------|-----------|---------|
| Nama Pembangkit                | Area       | Magnitude | Angle   |
| Kalselteng 1                   | Kalselteng | 0,005     | 89,508  |
| Bangkanai                      | Kalselteng | 0,014     | 91,793  |
| Kaltim Peaker                  | Kaltimra   | 0,002     | -84,727 |
| PLTU Kaltim MT                 | Kaltimra   | 0,002     | -86,464 |
| Kaltim 4                       | Kaltimra   | 0,002     | -86,622 |
| Senipah Steam                  | Kaltimra   | 0,003     | -87,042 |

**Tabel 4. 8** (Lanjutan) *Observeability*  $\omega$  Mode 308

| Nama Pembangkit | Area     | Magnitude | Angle   |
|-----------------|----------|-----------|---------|
| GT SNP          | Kaltimra | 0,003     | -87,066 |
| SMB             | Kaltimra | 0,002     | -93,740 |
| Cogindo         | Kaltimra | 0,002     | -94,177 |
| Embalut         | Kaltimra | 0,002     | -95,402 |

Berdasarkan *observeability*  $\omega$  dapat dilihat mode 308 merupakan mode *inter-area* antara pembangkit pada area Kalselteng dengan Kaltimra karena melibatkan pembangkit dari kedua area tersebut

dan berdasarkan sudut antara pembangkit pada area Kalselteng dan area Kaltimra berlawanan atau *counter phase* sehingga dapat dikatakan untuk mode 308 merupakan mode osilasi *inter-area* karena berdasarkan nilai frekuensi pada Tabel 4.6 dan berdasarkan *observeability*  $\omega$  dapat dilihat berdasarkan sudutnya. Berdasarkan hasil *observeability* dapat dilihat juga mode 308 merupakan mode yang sama dengan mode 283 pada tahun 2023.

#### 4.3.3 Participation factor ( Mode 308)

Pada subbab ini akan ditampilkan *participation factor* dari mode 308 untuk mengetahui *state variable* dan generator mana saja yang memiliki kontribusi terhadap nilai *eigenvalue* pada mode 308 dimana akan ditampilkan *participation factor*  $\delta$  dan *participation factor*  $\omega$  karena pada mode elektromekanikal erat kaitan dengan rotor sehingga *participation factor* terbesar berasal dari  $\delta$  dan  $\omega$ .

**Tabel 4. 9** *Participation factor*  $\delta$  Mode 308

| <i>Participation factor</i> $\delta$ |            |           |
|--------------------------------------|------------|-----------|
| Nama Pembangkit                      | Area       | Magnitude |
| Bangkanai                            | Kalselteng | 0,967     |
| Kalselteng 1                         | Kalselteng | 0,298     |

**Tabel 4. 10** *Participation factor*  $\omega$  Mode 308

| <i>Participation factor</i> $\omega$ |            |           |
|--------------------------------------|------------|-----------|
| Nama Pembangkit                      | Area       | Magnitude |
| Bangkanai                            | Kalselteng | 1         |
| Kalselteng 1                         | Kalselteng | 0,230     |

Tabel diatas menampilkan *participation factor* dari mode yang bersangkutan, dapat dilihat *participation factor* terbesar adalah berasal dari state yang berhubungan erat dengan rotor karenakan merupakan mode elektromekanikal, berdasarkan *participation factornya* dapat dilihat bahwa *eigenvalue* untuk mode 308 lebih sensitif terhadap generator pada area Kalselteng terutama pada pembangkit Bangkanai dan Kalselteng 1, dan jika dilihat dari *observeability* dan *participation factor* dimana generator Bangkanai lebih *observeable* dibandingkan dengan Kalselteng 1 maka pembangkit Bangkanai akan lebih rentan terhadap gangguan jika dibandingkan dengan Kalselteng 1. Hasil dari *participation factor* mode 308 menunjukan hasil yang sama dengan mode 283 pada tahun 2023 hal ini menunjukan dengan topologi yang sama dimana ditambahkan

pembangkit dan penambahan beban mode yang sama akan tetap ada namun nilai frekuensi dan damping rasionya dipengaruhi oleh topologi jaringan, kondisi operasi dan pembebanan.

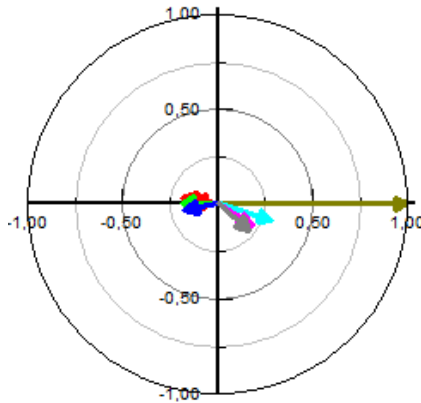
#### 4.3.4 Mode Shape Eigenvalue (Mode 280)

Pada mode 280 memiliki *damping ratio* sebesar 4,002% dengan frekuensi 1,27760. Mode 280 memiliki *mode shape* atau *observeability* dimana dapat dilihat berdasarkan *observeability* sudut rotor ( $\delta$ ) dan *observeability* kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) sebagai berikut :

**Tabel 4. 11** *Observeability*  $\delta$  Mode 280

| <i>Observeability</i> $\delta$ |            |           |          |
|--------------------------------|------------|-----------|----------|
| Nama Pembangkit                | Area       | Magnitude | Angle    |
| PLTG Kalteng                   | Kalselteng | 1         | 0,000    |
| Kalsel FTP 1                   | Kalselteng | 0,181     | 170,002  |
| Bangkanai                      | Kalselteng | 0,138     | 171,968  |
| Kalselteng 2                   | Kalselteng | 0,193     | 178,866  |
| Kalselteng 1                   | Kalselteng | 0,297     | -16,740  |
| Sampit                         | Kalselteng | 0,212     | -32,701  |
| Pulpis                         | Kalselteng | 0,219     | -40,936  |
| Asam-Asam                      | Kalselteng | 0,186     | -169,396 |

Dari data *observeability* diatas dapat dilihat bahwa mode 280 merupakan mode *local area* karena hanya melibatkan pembangkit pada area Kalselteng saja dan jika dikelompokan berdasarkan sudut nya dapat dilihat bahwa pembangkit PLTG Kalteng, Kalselteng 1, Sampit, dan Pulpis saling berosilasi terhadap pembangkit lainnya karena sudutnya berlawanan atau *counter phase* dengan PLTG Kalteng sebagai pembangkit dengan magnitude yang terbesar dan dapat dikatakan sebagai pembangkit yang paling *observeable*, dalam bentuk fasor dapat diperlihatkan sebagai berikut :



**Gambar 4. 5 Phasor Plot *Observability*  $\delta$  Mode 280**

Selain berdasarkan *observability* sudut rotor ( $\delta$ ) dapat pula dilihat berdasarkan *observability* kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) yang ditampilkan sebagai berikut :

**Tabel 4. 12 *Observability*  $\omega$  Mode 280**

| <i>Observability</i> $\omega$ |            |           |          |
|-------------------------------|------------|-----------|----------|
| Nama Pembangkit               | Area       | Magnitude | Angle    |
| Pulpis                        | Kalselteng | 0,005     | 51,123   |
| Sampit                        | Kalselteng | 0,005     | 60,504   |
| Kalselteng 1                  | Kalselteng | 0,007     | 77,673   |
| PLTG Kalteng                  | Kalselteng | 0,025     | 93,271   |
| Kalsel FTP 1                  | Kalselteng | 0,005     | -82,917  |
| Kalselteng 2                  | Kalselteng | 0,005     | -93,198  |
| Bangkanai                     | Kalselteng | 0,004     | -100,601 |
| Asam-Asam                     | Kalselteng | 0,005     | -101,219 |

Berdasarkan *observability*  $\omega$  didapatkan informasi yang sama bahwa mode 280 merupakan mode *local area* pada area Kalselteng karena melibatkan hanya pembangkit pada area Kalselteng dimana PLTG Kalteng, Kalselteng 1, Sampit, dan Pulpis saling berosilasi terhadap pembangkit lainnya karena sudutnya berlawanan atau *counter phase* dengan PLTG Kalteng sebagai pembangkit dengan magnitude yang terbesar dan dapat dikatakan sebagai pembangkit yang paling *observable*.

#### 4.3.5 Participation factor ( Mode 280)

Pada subbab ini akan ditampilkan *participation factor* dari mode 308 untuk mengetahui *state variable* dan generator mana saja yang memiliki kontribusi terhadap nilai *eigenvalue* pada mode 308 dimana akan ditampilkan *participation factor*  $\delta$  dan *participation factor*  $\omega$  karena pada mode elektromekanikal erat kaitan dengan rotor sehingga *participation factor* terbesar berasal dari  $\delta$  dan  $\omega$ .

**Tabel 4. 13** *Participation factor*  $\delta$  Mode 280

| <i>Participation factor</i> $\delta$ |            |           |
|--------------------------------------|------------|-----------|
| Nama Pembangkit                      | Area       | Magnitude |
| PLTG Kalteng                         | Kalselteng | 0,963     |

**Tabel 4. 14** *Participation factor*  $\omega$  Mode 280

| <i>Participation factor</i> $\omega$ |            |           |
|--------------------------------------|------------|-----------|
| Nama Pembangkit                      | Area       | Magnitude |
| PLTG Kalteng                         | Kalselteng | 1         |

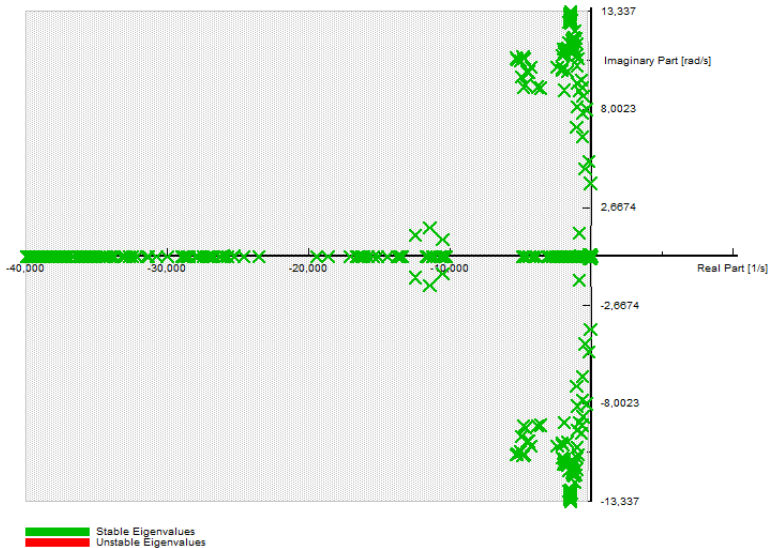
Tabel diatas menampilkan *participation factor* dari mode yang bersangkutan, dapat dilihat *participation factor* terbesar adalah berasal dari state yang berhubungan erat dengan rotor karenakan merupakan mode elektromekanikal, berdasarkan *participation factornya* dapat dilihat bahwa *eigenvalue* untuk mode 280 lebih sensitif terhadap generator pada area Kalselteng lebih tepatnya pada PLTG Kalteng. Berdasarkan informasi dari *observeability* dan *participation factor* dimana PLTG Kalteng merupakan pembangkit yang paling *observeable* dan dengan *participation factor* terbesar maka pembangkit PLTG Kalteng akan lebih rentan terhadap gangguan jika dibandingkan dengan pembangkit pada area Kalselteng lain untuk mode 280.

#### 4.4 Modal analysis Kelistrikan Kalimantan Tahun 2029

Pada tahun 2029 sistem Kelistrikan Kalimantan sudah saling terhubung atau terinterkoneksi dengan sistem *backbone* 500 kV. Pada tahun 2029 terdapat penambahan pembangkit PLTA Kaltara, PLTA Kelai dan PLTA Tabang pada area Kaltimra dengan data beban sesuai dengan tabel pada Bab 3.

#### 4.4.1 Eigenvalue Kelistrikan Kalimantan Tahun 2029

*Modal analysis* pada sistem kelistrikan Kalimantan pada tahun 2029 menghasilkan 861 nilai *eigenvalue* dimana seluruh nilai *eigenvalue* menunjukkan bahwa sistem stabil dikarenakan seluruh bagian *real* dari nilai *eigenvalue* bernilai negatif, berikut adalah plot seluruh nilai *eigenvalue* :



**Gambar 4. 6** Plot *Eigenvalue* Kelistrikan Kalimantan Tahun 2029

Dari 861 nilai *eigenvalue* ditampilkan beberapa nilai *eigenvalue* dengan *damping ratio* dibawah 10% dan selanjutnya akan di analisis nilai *eigenvalue* dengan *damping ratio* 5% hal ini dilakukan karena dengan *damping ratio* dibawah 5 % waktu yang dibutuhkan sistem untuk kembali ke dalam kondisi *steady state* akan semakin lama sehingga jika terjadi gangguan lain pada saat sistem menuju *steady state* akan menyebabkan sistem beresiko tinggi untuk *breakdown*.

**Tabel 4. 15** *Eigenvalue* dengan Damping Dibawah 10% Tahun 2029

| Mode       | Real            | Imaginer       | Frequency      | Damping Ratio |
|------------|-----------------|----------------|----------------|---------------|
| <b>378</b> | <b>-0,08468</b> | <b>3,97306</b> | <b>0,63233</b> | <b>2,131%</b> |
| <b>350</b> | <b>-0,19961</b> | <b>5,19564</b> | <b>0,82691</b> | <b>3,839%</b> |
| <b>312</b> | <b>-0,33907</b> | <b>8,01774</b> | <b>1,27606</b> | <b>4,225%</b> |
| 301        | -0,59691        | 8,71930        | 1,38772        | 6,830%        |
| 289        | -0,63758        | 9,18834        | 1,46237        | 6,922%        |
| 283        | -0,71922        | 9,60340        | 1,52843        | 7,468%        |
| 322        | -0,62453        | 7,84434        | 1,24847        | 7,936%        |
| 267        | -0,94961        | 10,78054       | 1,71578        | 8,775%        |
| 277        | -0,94961        | 10,78054       | 1,71578        | 8,775%        |

Pada tahun 2026 dapat dilihat terdapat tiga nilai *eigenvalue* dengan *damping ratio* dibawah 5% sehingga merupakan nilai *eigenvalue* yang kritis atau sudah mendekati sumbu positif sehingga perlu dilakukan analisis pembangkit mana saja yang berpengaruh pada *eigenvalue* ini.

#### **4.4.2 Mode Shape *Eigenvalue* ( Mode 378)**

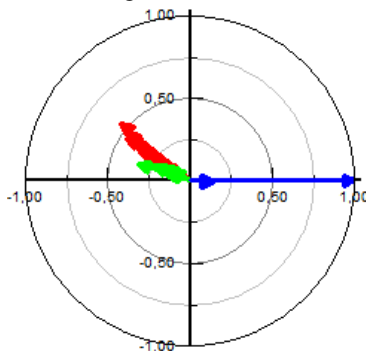
Pada mode 378 memiliki *damping ratio* sebesar 2,131 % dimana merupakan *damping ratio* terendah dan dapat dilihat nilai bagian real dari mode 378 sudah mendekati nol atau sumbu positif dengan frekuensi 0,63233 . Mode 378 memiliki *mode shape* atau *observeability* dimana dapat dilihat berdasarkan *observeability* sudut rotor ( $\delta$ ) dan *observeability* kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) sebagai berikut :



**Tabel 4. 16** *Observeability*  $\delta$  Mode 378

| <i>Observeability</i> $\delta$ |            |           |         |
|--------------------------------|------------|-----------|---------|
| Nama Pembangkit                | Area       | Magnitude | Angle   |
| Kaltim MT                      | Kaltimra   | 0,148     | -2,536  |
| PLTA Kaltara                   | Kaltimra   | 1,000     | 0,000   |
| PLTU Kalbar 1                  | Kalbar     | 0,483     | 142,820 |
| PLTU Kura-kura 1               | Kalbar     | 0,471     | 143,522 |
| PLTU Parit Baru 2              | Kalbar     | 0,463     | 146,007 |
| PLTU Kalbar 3                  | Kalbar     | 0,402     | 146,547 |
| MPP Kalbar                     | Kalbar     | 0,369     | 146,957 |
| Kalbar Peaker 1                | Kalbar     | 0,369     | 146,957 |
| PLTU Parit Baru 1              | Kalbar     | 0,369     | 146,957 |
| Bangkanai                      | Kalselteng | 0,356     | 147,786 |
| Kalselteng 1                   | Kalselteng | 0,298     | 148,642 |
| Pulpis                         | Kalselteng | 0,197     | 149,112 |
| Asam-Asam                      | Kalselteng | 0,171     | 152,191 |
| Sampit                         | Kalselteng | 0,197     | 155,372 |
| Kalselteng 2                   | Kalselteng | 0,151     | 156,270 |
| PLTG Kalteng                   | Kalselteng | 0,239     | 156,934 |

Dari data *observeability*  $\delta$  dapat dilihat bahwa mode 378 merupakan mode *inter-area* karena meliputi pembangkit dari ketiga area yaitu Kaltimra, Kalselteng, dan Kalbar. Jika dikelompokkan berdasarkan sudut magnitudenya dapat dilihat bahwa pembangkit pada area Kaltimra dalam hal ini PLTA Kaltara dan Kaltim MT saling berosilasi terhadap pembangkit lain dari kedua area lainnya, dan berdasarkan magnitudenya PLTA Kaltara menjadi pembangkit yang paling *observeable*. Bentuk fasor dapat diperlihatkan sebagai berikut :

**Gambar 4. 7** Phasor Plot *Observeability*  $\delta$  Mode 378

Selain berdasarkan *observeability* sudut rotor ( $\delta$ ) dapat pula dilihat berdasarkan *observeability* kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) yang ditampilkan sebagai berikut :

**Tabel 4. 17** *Observeability*  $\omega$  Mode 378

| <i>Observeability</i> $\omega$ |            |           |          |
|--------------------------------|------------|-----------|----------|
| Nama Pembangkit                | Area       | Magnitude | Angle    |
| Kaltim MT                      | Kaltimra   | 0,002     | 46,658   |
| PLTA Kaltara                   | Kaltimra   | 0,012     | 86,160   |
| PLTA Kusan                     | Kalselteng | 0,002     | -79,266  |
| Kalsel FTP 1                   | Kalselteng | 0,002     | -80,673  |
| Kalselteng 2                   | Kalselteng | 0,002     | -81,744  |
| Asam-Asam                      | Kalselteng | 0,003     | -87,558  |
| Sampit                         | Kalselteng | 0,003     | -88,325  |
| PLTG Kalteng                   | Kalselteng | 0,003     | -90,775  |
| Bangkanai                      | Kalselteng | 0,005     | -91,820  |
| Pulpis                         | Kalselteng | 0,003     | -93,211  |
| Kalselteng 1                   | Kalselteng | 0,004     | -101,870 |
| PLTU Kalbar 2                  | Kalbar     | 0,005     | -105,476 |
| Kalbar Peaker 1                | Kalbar     | 0,005     | -106,769 |
| PLTU Parit Baru 1              | Kalbar     | 0,005     | -106,769 |
| MPP Kalbar                     | Kalbar     | 0,005     | -108,371 |
| PLTU Parit Baru 2              | Kalbar     | 0,006     | -110,670 |
| PLTU Kalbar 3                  | Kalbar     | 0,006     | -111,631 |

Berdasarkan *observeability*  $\omega$  dapat dilihat bahwa menunjukan informasi yang sama dengan *observeability*  $\delta$  dimana berdasarkan informasi sudut magnitudenya dapat dikatakan mode 378 merupakan mode *inter-area* dimana melibatkan ketiga area yaitu Kaltimra, Kalselteng, dan Kalbar. Jika dikelompokan berdasarkan sudut magnitudenya dapat dilihat bahwa pembangkit pada area Kaltimra dalam hal ini PLTA Kaltara dan Kaltim MT saling berosilasi terhadap pembangkit lain dari kedua area lainnya, dan berdasarkan magnitudenya PLTA Kaltara menjadi pembangkit yang paling *observeable*

#### 4.4.3 Participation factor (Mode 378)

Pada subbab ini akan ditampilkan *participation factor* dari mode 378 untuk mengetahui *state variable* dan generator mana saja yang memiliki kontribusi terhadap nilai *eigenvalue* pada mode 378 dimana akan ditampilkan *participation factor*  $\delta$  dan *participation factor*  $\omega$  karena pada mode elektromekanikal erat kaitan dengan rotor sehingga *participation factor* terbesar berasal dari  $\delta$  dan  $\omega$ .

**Tabel 4. 18** *Participation factor*  $\delta$  Mode 378

| <i>Participation factor</i> $\delta$ |          |           |
|--------------------------------------|----------|-----------|
| Nama Pembangkit                      | Area     | Magnitude |
| PLTA Kaltara                         | Kaltimra | 1         |

**Tabel 4. 19** *Participation factor*  $\omega$  Mode 378

| <i>Participation factor</i> $\omega$ |          |           |
|--------------------------------------|----------|-----------|
| Nama Pembangkit                      | Area     | Magnitude |
| PLTA Kaltara                         | Kaltimra | 0,880     |
| PLTU Kalbar 1                        | Kalbar   | 0,101     |

Tabel diatas menampilkan *participation factor* dari mode yang bersangkutan, dapat dilihat *participation factor* terbesar adalah berasal dari state yang berhubungan erat dengan rotor dikarenakan merupakan mode elektromekanikal, berdasarkan *participation factornya* dapat dilihat bahwa *eigenvalue* untuk mode 378 lebih sensitif terhadap generator pada area Kaltimra dan Kalbar lebih tepatnya pada PLTA Kaltara. Berdasarkan informasi dari *observeability* dan *participation factor* dimana PLTA Kaltara merupakan pembangkit yang paling *observeable* dan dengan *participation factor* terbesar maka pembangkit PLTA Kaltara akan lebih rentan terhadap gangguan jika dibandingkan dengan pembangkit pada area Kaltimra, Kalselteng dan Kalbar lain untuk mode 280 dikarenakan merupakan mode *inter-area*.

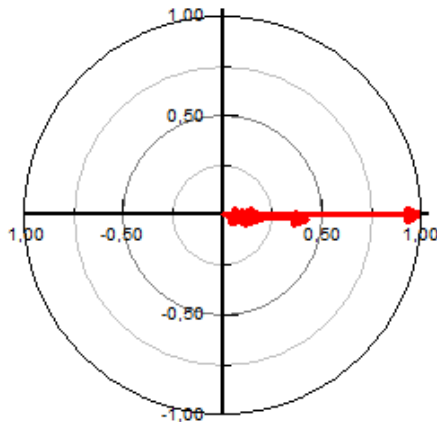
#### 4.4.4 Mode Shape Eigenvalue ( Mode 350)

Pada mode 350 memiliki *damping ratio* sebesar 3,839 % dengan frekuensi 0,82691. Mode 350 memiliki *mode shape* atau *observeability* dimana dapat dilihat berdasrakan *observeability* sudut rotor ( $\delta$ ) dan *observeability* kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) sebagai berikut :

**Tabel 4. 20** *Observeability*  $\delta$  Mode 350

| <i>Observeability</i> $\delta$ |            |           |        |
|--------------------------------|------------|-----------|--------|
| Nama Pembangkit                | Area       | Magnitude | Angle  |
| Bangkanai                      | Kalselteng | 1         | 0,000  |
| Kalselteng 1                   | Kalselteng | 0,431     | -2,820 |
| PLTA Kaltara                   | Kaltimra   | 0,208     | -3,088 |
| PLTG Kalteng                   | Kaselteng  | 0,185     | -5,942 |
| Sampit                         | Kalselteng | 0,159     | -6,357 |
| Pulpis                         | Kalselteng | 0,119     | -9,203 |

Dari data *observeability*  $\delta$  dapat dilihat bahwa mode 2029 merupakan mode *inter area* antara area Kalselteng dan Kaltimra karena melibatkan generator dari area Kalselteng dan Kaltimra namun berdasarkan sudutnya belum dapat dilihat dikarenakan sudutnya saling berhimpit atau seluruh pembangkit saling berosilasi bersama dan dalam bentuk fasor dapat diperlihatkan sebagai berikut :



**Gambar 4. 8** Phasor Plot *Observeability*  $\delta$  Mode 350

Selain berdasarkan *observeability* sudut rotor ( $\delta$ ) dapat pula dilihat berdasarkan *observeability* kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) yang ditampilkan sebagai berikut :

**Tabel 4. 21** *Observeability*  $\omega$  Mode 350

| <i>Observeability</i> $\omega$ |            |           |          |
|--------------------------------|------------|-----------|----------|
| Nama Pembangkit                | Area       | Magnitude | Angle    |
| Kalselteng 1                   | Kalselteng | 0,005     | 88,661   |
| Bangkanai                      | Kalselteng | 0,015     | 92,309   |
| SMB                            | Kaltimra   | 0,002     | -87,777  |
| PLTU Kaltim MT                 | Kaltimra   | 0,002     | -89,116  |
| GT SNP                         | Kaltimra   | 0,002     | -89,481  |
| Senipah Steam                  | Kaltimra   | 0,002     | -89,572  |
| Cogindo                        | Kaltimra   | 0,002     | -94,765  |
| Kaltim Peaker                  | Kaltimra   | 0,002     | -94,833  |
| PLTA Tabang                    | Kaltimra   | 0,003     | -101,090 |

Berdasarkan *observeability*  $\omega$  dapat dilihat bahwa mode 308 merupakan mode *inter-area* karena melibatkan pembangkit dari dua area yaitu Kalselteng dan Kaltimra dimana jika berdasarkan *observeability*  $\delta$  belum dapat dilihat berdasarkan sudutnya dari informasi *observeability*  $\omega$  jika dikelompokkan berdasarkan sudutnya dapat dilihat bahwa pembangkit pada area Kalselteng saling berosilasi terhadap pembangkit pada area Kaltimra dengan pembangkit Bangkanai sebagai pembangkit dengan magnitude paling besar atau pema .

#### 4.4.5 *Participation factor* ( Mode 350)

Pada subbab ini akan ditampilkan *participation factor* dari mode 350 untuk mengetahui *state variable* dan generator mana saja yang memiliki kontribusi terhadap nilai *eigenvalue* pada mode 350 dimana akan ditampilkan *participation factor*  $\delta$  dan *participation factor*  $\omega$  karena pada mode elektromekanikal erat kaitan dengan rotor sehingga *participation factor* terbesar berasal dari  $\delta$  dan  $\omega$ .

**Tabel 4. 22** *Participation factor*  $\delta$  Mode 308

| <i>Participation factor</i> $\delta$ |            |           |
|--------------------------------------|------------|-----------|
| Nama Pembangkit                      | Area       | Magnitude |
| Bangkanai                            | Kalselteng | 0,947     |
| Kalselteng 1                         | Kalselteng | 0,305     |
| PLTA Kaltara                         | Kaltimra   | 0,121     |

**Tabel 4. 23** *Participation factor*  $\omega$  Mode 350

| <i>Participation factor</i> $\delta$ |            |           |
|--------------------------------------|------------|-----------|
| Nama Pembangkit                      | Area       | Magnitude |
| Bangkanai                            | Kalselteng | 1         |
| Kalselteng 1                         | Kalselteng | 0,25      |
| PLTA Tabang                          | Kaltimra   | 0,13      |

Tabel diatas menampilkan *participation factor* dari mode yang bersangkutan, dapat dilihat *participation factor* terbesar adalah berasal dari state yang berhubungan erat dengan rotor dikarenakan merupakan mode elektromekanikal, berdasarkan *participation factornya* dapat dilihat bahwa *eigenvalue* untuk mode 350 lebih sensitif terhadap generator pada area Kalselteng dan Kaltimra lebih tepatnya pada pembangkit Bangkanai. Berdasarkan informasi dari *observeability* dan *participation factor* dimana Bangkanai merupakan pembangkit yang paling *observeable* dan dengan *participation factor* terbesar maka pembangkit Bangkanai akan lebih rentan terhadap gangguan jika dibandingkan dengan pembangkit pada area Kalselteng dan Kaltimra lainnya untuk mode 350 dikarenakan merupakan mode *inter-area*.

#### 4.4.6 Mode Shape *Eigenvalue* ( Mode 312)

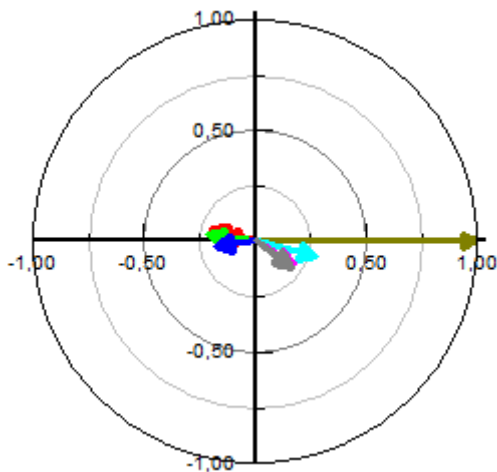
Pada mode 312 memiliki *damping ratio* sebesar 3,493%. dengan frekuensi 1,27606 Mode 312 memiliki *mode shape* atau *observeability* dimana dapat dilihat berdasrakan *observeability* sudut rotor ( $\delta$ ) dan *observeability* kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) sebagai berikut :

**Tabel 4. 24** *Observeability*  $\delta$  Mode 312

| <i>Observeability</i> $\delta$ |            |           |          |
|--------------------------------|------------|-----------|----------|
| Nama Pembangkit                | Area       | Magnitude | Angle    |
| Kalselteng 2                   | Kalselteng | 0,216     | 164,541  |
| Bangkanai                      | Kalselteng | 0,148     | 166,677  |
| Kalselteng 1                   | Kalselteng | 0,277     | 172,569  |
| PLTG Kalteng                   | Kalselteng | 1         | -14,051  |
| Pulpis                         | Kalselteng | 0,201     | -30,808  |
| Sampit                         | Kalselteng | 0,199     | -34,993  |
| Asam-Asam                      | Kalselteng | 0,208     | -36,261  |
| Kalsel FTP 1                   | Kalselteng | 0,181     | -172,742 |

Dari data *observeability*  $\delta$  dilihat bahwa mode 312 merupakan mode *local area* ,hal ini dapat dilihat berdasarkan frekuensi dan pembangkit yang meliputi pada mode 312 yaitu hanya pembangkit pada

area Kalselteng saja selain itu hal ini dapat dilihat pula berdasarkan sudut dari mangitude dimana sudut antar pembangkit saling berlawanan atau *counter phase* sehingga dapat dikatakan merupakan mode osilasi lokal pada area Kalselteng dan jika di kelompokkan berdasarkan sudutnya PLTG Kalteng, Pulpis, Sampit, Asam-Asam, Kalsel FTP 1 akan saling berosilasi terhadap pembangkit lain yaiyu pembangkit Kalselteng 2, Bangkanai, dan Kalselteng 1 dan PLTG Kalteng sebagai pembangkit dengan magnitude terbesar dan paling *observeable*. Bentuk fasor dapat diperlihatkan sebagai berikut :



**Gambar 4. 9** Phasor Plot *Observeability*  $\delta$  Mode 312

Selain berdasarkan *observeability* sudut rotor ( $\delta$ ) dapat pula dilihat berdasarkan *observeability* kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) yang ditampilkan sebagai berikut :

**Tabel 4. 25** *Observeability*  $\omega$  Mode 312

| <i>Observeability</i> $\omega$ |            |           |        |
|--------------------------------|------------|-----------|--------|
| Nama Pembangkit                | Area       | Magnitude | Angle  |
| Pulpis                         | Kalselteng | 0,005     | 54,748 |
| Sampit                         | Kalselteng | 0,005     | 60,400 |
| Kalselteng 1                   | Kalselteng | 0,007     | 78,022 |

**Tabel 4. 25**(Lanjutan) *Observeability*  $\omega$  Mode 312

| Nama Pembangkit | Area       | Magnitude | Angle    |
|-----------------|------------|-----------|----------|
| PLTG Kalteng    | Kalselteng | 0,025     | 92,451   |
| Kalsel FTP 1    | Kalselteng | 0,005     | -80,805  |
| Kalselteng 2    | Kalselteng | 0,006     | -94,848  |
| Bangkanai       | Kalselteng | 0,004     | -100,342 |
| Asam-Asam       | Kalselteng | 0,006     | -102,548 |

Dari informasi *observeability*  $\omega$  memberikan informasi yang sama dengan *observeability*  $\delta$  dimana menunjukkan bahwa mode 312 merupakan mode osilasi lokal dimana pembangkit pada area yang sama saling berosilasi satu sama lain hal ini dapat dilihat dari sudut mangitudenya dimana menunjukkan sudut yang saling berlawanan atau *counter phase*.

#### 4.4.7 Participation factor ( Mode 312)

Pada subbab ini akan ditampilkan *participation factor* dari mode 312 untuk mengetahui *state variable* dan generator mana saja yang memiliki kontribusi terhadap nilai *eigenvalue* pada mode 312 dimana akan ditampilkan *participation factor*  $\delta$  dan *participation factor*  $\omega$  karena pada mode elektromekanikal erat kaitan dengan rotor sehingga *participation factor* terbesar berasal dari  $\delta$  dan  $\omega$ .

**Tabel 4. 26** *Participation factor*  $\delta$  Mode 312

| <i>Participation factor</i> $\delta$ |            |           |
|--------------------------------------|------------|-----------|
| Nama Pembangkit                      | Area       | Magnitude |
| PLTG Kalteng                         | Kalselteng | 0,951     |

**Tabel 4. 27** *Participation factor*  $\omega$  Mode 312

| <i>Participation factor</i> $\delta$ |            |           |
|--------------------------------------|------------|-----------|
| Nama Pembangkit                      | Area       | Magnitude |
| PLTG Kalteng                         | Kalselteng | 1         |

Tabel diatas menampilkan *participation factor* dari mode yang bersangkutan, dapat dilihat *participation factor* terbesar adalah berasal dari state yang berhubungan erat dengan rotor dikarenakan merupakan mode elektromekanikal, berdasarkan *participation factornya* dapat dilihat bahwa *eigenvalue* untuk mode 312 lebih sensitif terhadap generator pada area Kalselteng lebih tepatnya pada PLTG Kalteng. Berdasarkan



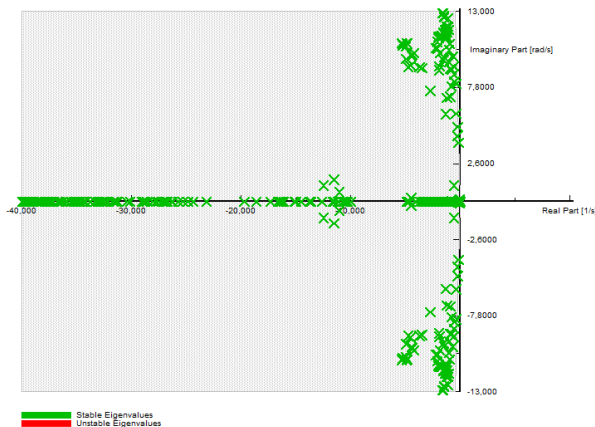
informasi dari *observeability* dan *participation factor* dimana PLTG Kalteng merupakan pembangkit yang paling *observeable* dan dengan *participation factor* terbesar dan akan lebih rentan terhadap gangguan jika dibandingkan dengan pembangkit pada area Kalselteng lain untuk mode 312 dikarenakan merupakan mode *local area*.

## 4.5 Modal analysis Kelistrikan Kalimantan Tahun 2032

Pada tahun 2032 sistem Kelistrikan Kalimantan sudah saling terhubung atau terinterkoneksi dengan sistem *backbone* 500 kV dan pada tahun 2032 sistem transmisi HVDC menuju Jawa beroperasi dengan mengirimkan daya sebesar 1000 MW menuju beban di Jawa dengan jarak 500 km. Pada tahun 2032 terdapat penambahan dua pembangkit PLTU 400 MW pada area Kalselteng dan Kayan Hydro sebesar 5 x 400 MW pada area Kaltimra dan dengan data beban sesuai dengan data beban.

### 4.5.1 Eigenvalue Kelistrikan Kalimantan Tahun 2032

*Modal analysis* pada sistem kelistrikan Kalimantan pada tahun 2032 menghasilkan 954 nilai *eigenvalue* dimana seluruh nilai *eigenvalue* menunjukkan bahwa sistem stabil dikarenakan seluruh bagian *real* dari nilai *eigenvalue* bernilai negatif, berikut adalah plot seluruh nilai *eigenvalue* :



**Gambar 4. 10** Plot *Eigenvalue* Kelistrikan Kalimantan Tahun 2032

Dari 954 nilai *eigenvalue* ditampilkan beberapa nilai *eigenvalue* dengan *damping ratio* dibawah 10% dan selanjutnya akan di analisis nilai *eigenvalue* dengan *damping ratio* 5% hal ini dilakukan karena dengan *damping ratio* dibawah 5 % waktu yang dibutuhkan sistem

untuk kembali ke dalam kondisi *steady state* akan semakin lama sehingga jika terjadi gangguan lain pada saat sistem menuju *steady state* akan menyebabkan sistem beresiko tinggi untuk *breakdown*.

**Tabel 4. 28** *Eigenvalue* dengan Damping Dibawah 10% Tahun 2032

| Mode       | Real            | Imaginer       | Frequency      | Damping Ratio |
|------------|-----------------|----------------|----------------|---------------|
| <b>420</b> | <b>-0,14734</b> | <b>4,00499</b> | <b>0,63741</b> | <b>3,677%</b> |
| <b>358</b> | <b>-0,30860</b> | <b>8,03493</b> | <b>1,27880</b> | <b>3,838%</b> |
| <b>407</b> | <b>-0,22863</b> | <b>5,09582</b> | <b>0,81102</b> | <b>4,482%</b> |
| 418        | -0,26912        | 4,47755        | 0,71262        | 6,000%        |
| 354        | -0,49984        | 8,24468        | 1,31218        | 6,051%        |
| 388        | -0,36404        | 6,00181        | 0,95522        | 6,054%        |
| 322        | -0,58857        | 9,24444        | 1,47130        | 6,354%        |
| 334        | -0,58014        | 8,70042        | 1,38472        | 6,653%        |
| 302        | -0,69103        | 9,92609        | 1,57979        | 6,945%        |

Pada tahun 2032 dapat dilihat terdapat tiga nilai *eigenvalue* dengan *damping ratio* dibawah 5% sehingga merupakan nilai *eigenvalue* yang kritis atau sudah mendekati sumbu positif sehingga perlu dilakukan analisis pembangkit mana saja yang berpengaruh pada *eigenvalue* ini.

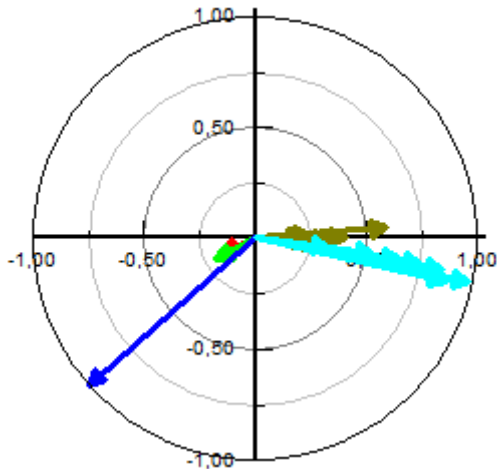
#### 4.5.2 Mode Shape *Eigenvalue* ( Mode 420)

Pada mode 420 memiliki *damping ratio* sebesar 3,493%. Mode 420 memiliki *mode shape* atau *observeability* dimana dapat dilihat berdasrakan *observeability* sudut rotor ( $\delta$ ) dan *observeability* kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) sebagai berikut :

**Tabel 4. 29** *Observeability*  $\delta$  Mode 420

| <i>Observeability</i> $\delta$ |            |           |          |
|--------------------------------|------------|-----------|----------|
| Nama Pembangkit                | Area       | Magnitude | Angle    |
| Kalselteng 1                   | Kalselteng | 0,407     | 0,548    |
| Asam-Asam                      | Kalselteng | 0,252     | 0,574    |
| Kalselteng 2                   | Kalselteng | 0,248     | 1,689    |
| PLTA Kusan                     | Kalselteng | 0,249     | 4,421    |
| Bangkanai                      | Kalselteng | 0,590     | 4,764    |
| PLTG Kalteng                   | Kalselteng | 0,330     | -0,182   |
| Pulpis                         | Kalselteng | 0,286     | -3,771   |
| PLTU Kalbar 2                  | Kalbar     | 0,532     | -7,148   |
| Sampit                         | Kalselteng | 0,332     | -7,459   |
| PLTU Parit Baru 1              | Kalbar     | 0,650     | -8,089   |
| PLTU Kalbar 3                  | Kalbar     | 0,749     | -8,691   |
| Kalbar Peaker 1                | Kalbar     | 0,679     | -9,288   |
| MPP Kalbar                     | Kalbar     | 0,679     | -9,288   |
| PLTU Kalbar 1                  | Kalbar     | 0,887     | -12,279  |
| PLTU Kura-Kura 1               | Kalbar     | 0,879     | -12,761  |
| PLTA Kaltara                   | Katimra    | 1,000     | -138,450 |
| PLTA Kelai                     | Kaltimra   | 0,200     | -152,775 |
| Kayan Hydro                    | Kaltimra   | 0,169     | -156,674 |

Dari data *observeability*  $\delta$  dapat dilihat bahwa mode 420 merupakan mode *inter-area* karena meliputi pembangkit dari ketiga area yaitu Kaltimra, Kalselteng, dan Kalbar. Jika dikelompokkan berdasarkan sudut magnitudenya dapat dilihat bahwa pembangkit pada area Kaltimra dalam hal ini PLTA Kaltara dan Kaltim MT dan Kayan Hydro saling beresilasi terhadap pembangkit lain dari kedua area lainnya, dan berdasarkan magnitudenya PLTA Kaltara menjadi pembangkit yang paling *observeable*. Bentuk fasor dapat diperlihatkan sebagai berikut :



**Gambar 4. 11** Phasor Plot *Observeability*  $\delta$  Mode 420

Selain berdasarkan *observeability* sudut rotor ( $\delta$ ) dapat pula dilihat berdasarkan *observeability* kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) yang ditampilkan sebagai berikut :

**Tabel 4. 30** *Observeability*  $\omega$  Mode 420

| <i>Observeability</i> $\omega$ |            |           |         |
|--------------------------------|------------|-----------|---------|
| Nama Pembangkit                | Area       | Magnitude | Angle   |
| PLTU Kura-Kura 1               | Kalbar     | 0,012     | 87,087  |
| PLTU Kalbar 1                  | Kalbar     | 0,012     | 87,471  |
| PLTU Parit Baru 2              | Kalbar     | 0,012     | 90,114  |
| Kalbar Peaker 1                | Kalbar     | 0,009     | 92,357  |
| MPP Kalbar                     | Kalbar     | 0,009     | 92,357  |
| PLTU Kalbar 2                  | Kalbar     | 0,008     | 96,576  |
| Kalselteng 1                   | Kalselteng | 0,006     | 105,888 |
| Bangkanai                      | Kalselteng | 0,009     | 105,951 |
| PLTA Kaltara                   | Kaltimra   | 0,011     | -48,884 |

Berdasarkan *observeability*  $\omega$  dapat dilihat bahwa menunjukkan hasil yang sama dengan *observeability*  $\delta$  dimana berdasarkan informasi sudut magnitudenya dapat dikatakan mode 420 merupakan mode *inter-*

area dimana melibatkan ketiga area yaitu Kaltimra, Kalselteng, dan Kalbar.

#### 4.5.3 Participation factor (Mode 420)

Pada subbab ini akan ditampilkan *participation factor* dari mode 420 untuk mengetahui *state variable* dan generator mana saja yang memiliki kontribusi terhadap nilai *eigenvalue* pada mode 420 dimana akan ditampilkan *participation factor*  $\delta$  dan *participation factor*  $\omega$  karena pada mode elektromekanikal erat kaitan dengan rotor sehingga *participation factor* terbesar berasal dari  $\delta$  dan  $\omega$ .

**Tabel 4. 31** *Participation factor*  $\delta$  Mode 420

| <i>Participation factor</i> $\delta$ |          |           |
|--------------------------------------|----------|-----------|
| Nama Pembangkit                      | Area     | Magnitude |
| PLTA Kaltara                         | Kaltimra | 1         |
| PLTU Kalbar 1                        | Kalbar   | 0,161     |

**Tabel 4. 32** *Participation factor*  $\omega$  Mode 420

| <i>Participation factor</i> $\delta$ |          |           |
|--------------------------------------|----------|-----------|
| Nama Pembangkit                      | Area     | Magnitude |
| PLTA Kaltara                         | Kaltimra | 0,804     |
| PLTU Kalbar                          | Kalbar   | 0,196     |

Tabel diatas menampilkan *participation factor* dari mode yang bersangkutan, dapat dilihat *participation factor* terbesar adalah berasal dari state yang berhubungan erat dengan rotor dikarenakan merupakan mode elektromekanikal, berdasarkan *participation factornya* dapat dilihat bahwa *eigenvalue* untuk mode 420 lebih sensitif terhadap generator pada area Kaltimra dan Kalbar lebih tepatnya pada PLTA Kaltara. Berdasarkan informasi dari *observeability* dan *participation factor* dimana PLTA Kaltara merupakan pembangkit yang paling *observeable* dan dengan *participation factor* terbesar maka pembangkit PLTA Kaltara akan lebih rentan terhadap gangguan jika dibandingkan dengan pembangkit pada area Kaltimra, Kalselteng dan Kalbar lain untuk mode 420 dikarenakan merupakan mode *inter-area*.

#### 4.5.4 Mode Shape Eigenvalue ( Mode 358)

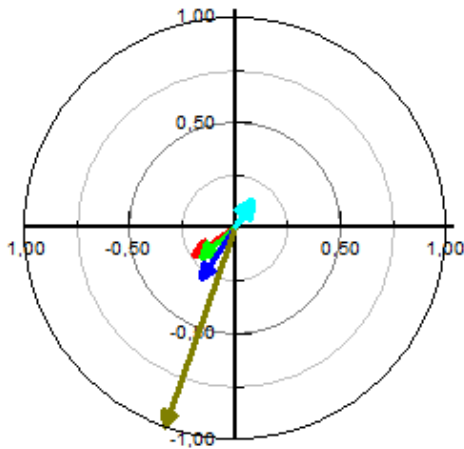
Pada mode 358 memiliki *damping ratio* sebesar 3,838% dengan frekuensi 1,27880 . Mode 358 memiliki *mode shape* atau

*observeability* dimana dapat dilihat berdasrakan *observeability* sudut rotor ( $\delta$ ) dan *observeability* kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) sebagai berikut :

**Tabel 4. 33** *Observeability*  $\delta$  Mode 358

| <i>Observeability</i> $\delta$ |            |           |          |
|--------------------------------|------------|-----------|----------|
| Nama Pembangkit                | Area       | Magnitude | Angle    |
| Bangkanai                      | Kalselteng | 0,152     | 58,418   |
| Kalselteng 2                   | Kalselteng | 0,147     | 61,063   |
| PLTG Kalteng                   | Kalselteng | 1,000     | -109,525 |
| Kalselteng 1                   | Kalselteng | 0,289     | -123,727 |
| Sampit                         | Kalselteng | 0,212     | -140,566 |
| Pulpis                         | Kalselteng | 0,235     | -145,759 |

Dari data *observeability*  $\delta$  dilihat bahwa dengan frekuensi 1,27880 dimana merupakan mode *local area* ,hal ini dapat dilihat bahwa hanya meliputi pembangkit dari area Kalselteng saja dan selain itu berdasarkan sudut dari mangitude dimana sudut antar pembangkit saling berlawanan atau *counter phase* sehingga dapat dikatakan merupakan mode osilasi lokal pada area Kalselteng. Jika dikelompokan berdasarkan sudutnya dapat dilihat bahwa pembangkit Bangkanai dan Kalselteng berosilasi terhadap PLTG Kalteng,Kalselteng 1, Sampit, Pulpis. Bentuk fasor dapat diperlihatkan sebagai berikut :



**Gambar 4. 12** Phasor Plot *Observeability*  $\delta$  Mode 358

Selain berdasarkan *observeability* sudut rotor ( $\delta$ ) dapat pula dilihat berdasarkan *observeability* kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) yang ditampilkan sebagai berikut :

**Tabel 4. 34** *Observeability*  $\omega$  Mode 358

| <i>Observeability</i> $\omega$ |            |           |         |
|--------------------------------|------------|-----------|---------|
| Nama Pembangkit                | Area       | Magnitude | Angle   |
| Bangkanai                      | Kalselteng | 0,004     | 150,624 |
| Kalselteng 2                   | Kalselteng | 0,004     | 153,072 |
| PLTG Kalteng                   | Kalselteng | 0,025     | -17,183 |
| Kalselteng 1                   | Kalselteng | 0,007     | -31,624 |
| Sampit                         | Kalselteng | 0,005     | -49,478 |
| Pulpis                         | Kalselteng | 0,006     | -54,812 |

Dari informasi *observeability*  $\omega$  memberikan informasi yang sama dengan *observeability*  $\delta$  dimana menunjukkan bahwa mode 358 merupakan mode osilasi lokal dimana pembangkit pada area yang sama saling berosilasi satu sama lain hal ini dapat dilihat dari sudut mangitudenya dimana menunjukkan sudut yang saling berlawanan atau *counter phase*.

#### 4.5.5 *Participation factor* ( Mode 358 )

Pada subbab ini akan ditampilkan *participation factor* dari mode 358 untuk mengetahui *state variable* dan generator mana saja yang memiliki kontribusi terhadap nilai *eigenvalue* pada mode 358 dimana akan ditampilkan *participation factor*  $\delta$  dan *participation factor*  $\omega$  karena pada mode elektromekanikal erat kaitan dengan rotor sehingga *participation factor* terbesar berasal dari  $\delta$  dan  $\omega$

**Tabel 4. 35** *Participation factor*  $\delta$  Mode 358

| <i>Participation factor</i> $\delta$ |            |           |
|--------------------------------------|------------|-----------|
| Nama Pembangkit                      | Area       | Magnitude |
| PLTG Kalteng                         | Kalselteng | 0,951     |

**Tabel 4. 36** *Participation factor*  $\omega$  Mode 358

| <i>Participation factor</i> $\omega$ |            |           |
|--------------------------------------|------------|-----------|
| Nama Pembangkit                      | Area       | Magnitude |
| PLTG Kalteng                         | Kalselteng | 0,951     |

Tabel diatas menampilkan *participation factor* dari mode yang bersangkutan, dapat dilihat *participation factor* terbesar adalah berasal dari state yang berhubungan erat dengan rotor dikarenakan merupakan mode elektromekanikal, berdasarkan *observeability* dan *participation factor* pembangkit PLTG Kalteng merupakan pembangkit dengan *observeability* dan *participation factor* terbesar sehingga pembangkit PLTG Kalteng dapat dikatakan menjadi pebangkit yang paling rentan menyebabkan ketidakstabilan jika terjadi gangguan

#### 4.5.6 Mode Shape Eigenvalue ( Mode 407 )

Pada mode 407 memiliki *damping ratio* sebesar 4,482%. Mode 407 memiliki *mode shape* atau *observeability* dimana dapat dilihat berdasarkan *observeability* sudut rotor ( $\delta$ ) dan *observeability* kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) sebagai berikut :

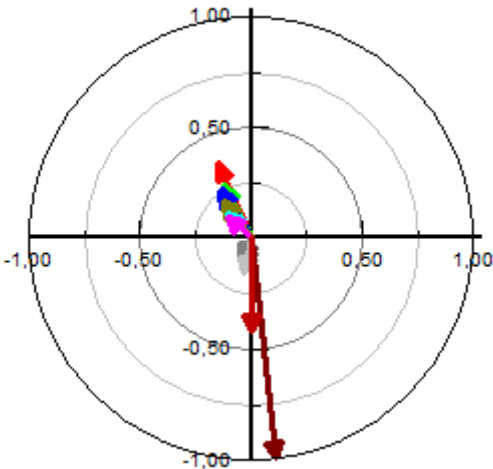
**Tabel 4. 37** *Observeability*  $\delta$  Mode 407

| <i>Observeability</i> $\delta$ |            |           |          |
|--------------------------------|------------|-----------|----------|
| Nama Pembangkit                | Area       | Magnitude | Angle    |
| PLTU Kurakura 1                | Kalbar     | 0,260     | 117,665  |
| PLTU Kalbar 1                  | Kalbar     | 0,269     | 118,119  |
| PLTU Parit Baru 2              | Kalbar     | 0,257     | 123,700  |
| PLTU Kalbar 3                  | Kalbar     | 0,209     | 127,215  |
| MPP Kalbar                     | Kalbar     | 0,154     | 133,450  |
| Kalbar Peaker 1                | Kalbar     | 0,154     | 133,450  |
| Bangkanai                      | Kalselteng | 1,000     | -83,797  |
| PLTG Kalteng                   | Kalselteng | 0,163     | -100,565 |
| PLTA Kaltara                   | Kaltimra   | 0,136     | -106,508 |
| Sampit                         | Kalselteng | 0,125     | -108,773 |
| Kalsel FTP 1                   | Kalselteng | 0,108     | -109,966 |
| Kalselteng 2                   | Kalselteng | 0,110     | -110,225 |
| Asam-Asam                      | Kalselteng | 0,110     | -111,515 |

Dari data *observeability*  $\delta$  dapat dilihat bahwa mode 407 merupakan mode *inter-area* karena meliputi pembangkit dari ketiga area yaitu Kaltimra, Kalselteng, dan Kalbar. Jika dikelompokkan berdasarkan sudut magnitudenya dapat dilihat bahwa pembangkit pada area Kalselteng dalam hal ini Bangkanai, PLTG kalteng, Sampit, Kalsel FTP 1, Kalselteng 2, dan Asam-Asam saling berosiasi terhadap pembangkit lain dari kedua area lainnya, dan berdasarkan magnitudenya Bangkanai



menjadi pembangkit yang paling *observable*. Bentuk fasor dapat diperlihatkan sebagai berikut:



**Gambar 4. 13** Phasor Plot *Observeability*  $\delta$  Mode 407

Selain berdasarkan *observeability* sudut rotor ( $\delta$ ) dapat pula dilihat berdasarkan *observeability* kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) yang ditampilkan sebagai berikut :

**Tabel 4. 38** *Observeability*  $\omega$  Mode 407

| <i>Observeability</i> $\omega$ |            |           |          |
|--------------------------------|------------|-----------|----------|
| Nama Pembangkit                | Area       | Magnitude | Angle    |
| Kalselteng 1                   | Kalselteng | 0,006     | 5,010    |
| Bangkanai                      | Kalselteng | 0,016     | 9,726    |
| PLTG Kalteng                   | Kalselteng | 0,002     | -4,509   |
| MPP Kalbar                     | Kalbar     | 0,003     | -143,786 |
| Kalbar Peaker 1                | Kalbar     | 0,003     | -143,786 |
| PLTU Kalbar 3                  | Kalbar     | 0,004     | -147,143 |
| PLTU Parit Baru 2              | Kalbar     | 0,004     | -149,230 |
| PLTU Kalbar 1                  | Kalbar     | 0,005     | -154,216 |
| PLTU Kurakura 1                | Kalbar     | 0,005     | -154,799 |

Dari informasi *observeability*  $\omega$  memberikan informasi yang sama dengan *observeability*  $\delta$  dimana menunjukan bahwa mode 407

merupakan mode osilasi *inter-area* dimana pembangkit pada area yang berbeda saling berosilasi satu sama lain hal ini dapat dilihat dari sudut mangitudenya dimana menunjukan sudut yang saling berlawanan atau *counter phase*.

#### 4.5.7 Participation factor ( Mode 407 )

Pada subbab ini akan ditampilkan *participation factor* dari mode 407 untuk mengetahui *state variable* dan generator mana saja yang memiliki kontribusi terhadap nilai *eigenvalue* pada mode 407 dimana akan ditampilkan *participation factor*  $\delta$  dan *participation factor*  $\omega$  karena pada mode elektromekanikal erat kaitan dengan rotor sehingga *participation factor* terbesar berasal dari  $\delta$  dan  $\omega$

**Tabel 4. 39** *Participation factor*  $\delta$  Mode 407

| <i>Participation factor</i> $\delta$ |            |           |
|--------------------------------------|------------|-----------|
| Nama Pembangkit                      | Area       | Magnitude |
| Bangkanai                            | Kalselteng | 1         |
| Kalselteng 1                         | Kalselteng | 0,415     |
| PLTU Kalbar 1                        | Kalbar     | 0,269     |
| PLTA Kaltara                         | Kaltimra   | 0,135     |

**Tabel 4. 40** *Participation factor*  $\omega$  Mode 407

| <i>Participation factor</i> $\omega$ |            |           |
|--------------------------------------|------------|-----------|
| Nama Pembangkit                      | Area       | Magnitude |
| Bangkanai                            | Kalselteng | 1         |
| Kalselteng 1                         | Kalselteng | 0,304     |
| PLTU Kalbar 1                        | Kalbar     | 0,146     |

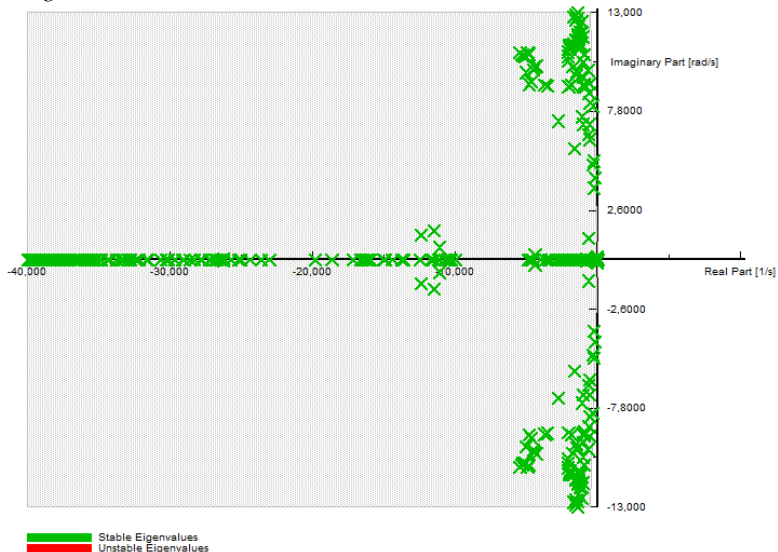
Tabel diatas menampilkan *participation factor* dari mode yang bersangkutan, dapat dilihat *participation factor* terbesar adalah berasal dari state yang berhubungan erat dengan rotor dikarenakan merupakan mode elektromekanikal, berdasarkan *participation factornya* dapat dilihat bahwa *eigenvalue* untuk mode 407 lebih sensitif terhadap generator pada area Kalselteng, Kaltimra dan Kalbar lebih tepatnya pada Bangkanai. Berdasarkan informasi dari *observeability* dan *participation factor* dimana Bangkanai merupakan pembangkit yang paling *observeable* dan dengan *participation factor* terbesar maka pembangkit Bangkanai akan lebih rentan terhadap gangguan jika dibandingkan dengan pembangkit pada area Kaltimra, Kalselteng dan Kalbar lain untuk mode 407 dikarenakan merupakan mode *inter-area*.

## 4.6 Modal analysis Kelistrikan Kalimantan Tahun 2035

Pada tahun 2035 sistem Kelistrikan Kalimantan sudah saling terhubung atau terinterkoneksi dengan sistem *backbone* 500 kV dan pada tahun 2035 sistem transmisi HVDC menuju Jawa beroperasi dengan mengirimkan daya sebesar 1000 MW menuju beban di Jawa dengan jarak 500 km. Pada tahun 2035 terdapat penambahan tiga pembangkit PLTU 400 MW pada area Kalselteng dan Kaltimra dan dengan data beban sesuai dengan data beban.

### 4.6.1 Eigenvalue Kelistrikan Kalimantan Tahun 2035

*Modal analysis* pada sistem kelistrikan Kalimantan pada tahun 2035 menghasilkan 994 nilai *eigenvalue* dimana seluruh nilai *eigenvalue* menunjukkan bahwa sistem stabil dikarenakan seluruh bagian *real* dari nilai *eigenvalue* bernilai negatif, berikut adalah plot seluruh nilai *eigenvalue* :



**Gambar 4. 14** Plot *Eigenvalue* Kelistrikan Kalimantan Tahun 2035

Dari 994 nilai *eigenvalue* ditampilkan beberapa nilai *eigenvalue* dengan *damping ratio* dibawah 10% dan selanjutnya akan di analisis nilai *eigenvalue* dengan *damping ratio* 5% hal ini dilakukan karena dengan *damping ratio* dibawah 5 % waktu yang dibutuhkan sistem

untuk kembali ke dalam kondisi *steady state* akan semakin lama sehingga jika terjadi gangguan lain pada saat sistem menuju *steady state* akan menyebabkan sistem beresiko tinggi untuk *breakdown*.

**Tabel 4. 41** *Eigenvalue* dengan Damping Dibawah 10% Tahun 2035

| Mode       | Real            | Imaginer       | Frequency      | Damping Ratio |
|------------|-----------------|----------------|----------------|---------------|
| <b>370</b> | <b>-0,31362</b> | <b>8,07615</b> | <b>1,28536</b> | <b>3,880%</b> |
| <b>434</b> | <b>-0,18265</b> | <b>4,31082</b> | <b>0,68609</b> | <b>4,233%</b> |
| <b>426</b> | <b>-0,25215</b> | <b>5,18824</b> | <b>0,82573</b> | <b>4,854%</b> |
| 428        | -0,29536        | 5,00366        | 0,79636        | 5,893%        |
| 368        | -0,50860        | 8,26769        | 1,31584        | 6,140%        |
| 324        | -0,60176        | 9,25271        | 1,47261        | 6,490%        |
| 346        | -0,59691        | 8,77698        | 1,39690        | 6,785%        |
| 316        | -0,69425        | 9,95640        | 1,58461        | 6,956%        |
| 436        | -0,27606        | 3,76121        | 0,59862        | 7,320%        |

Pada tahun 2032 dapat dilihat terdapat tiga nilai *eigenvalue* dengan *damping ratio* dibawah 5% sehingga merupakan nilai *eigenvalue* yang kritis atau sudah mendekati sumbu positif sehingga perlu dilakukan analisis pembangkit mana saja yang berpengaruh pada *eigenvalue* ini.

#### 4.6.2 Mode Shape *Eigenvalue* (Mode 370)

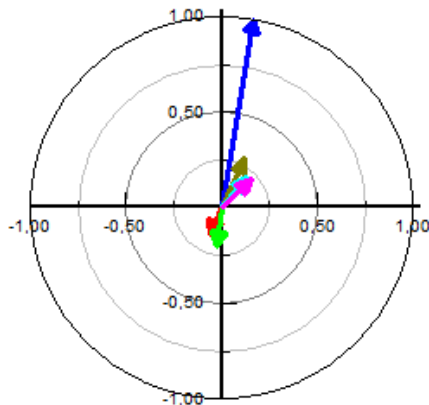
Pada mode 370 memiliki *damping ratio* sebesar 3,880% dengan frekuensi 1,28536. Mode 370 memiliki *mode shape* atau *observeability* dimana dapat dilihat berdasarkan *observeability* sudut rotor ( $\delta$ ) dan *observeability* kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) sebagai berikut :

**Tabel 4. 42** *Observeability*  $\delta$  Mode 370

| <i>Observeability</i> $\delta$ |            |           |          |
|--------------------------------|------------|-----------|----------|
| Nama Pembangkit                | Area       | Magnitude | Angle    |
| Pulpis                         | Kalselteng | 0,216     | 42,884   |
| Sampit                         | Kalselteng | 0,199     | 50,039   |
| Kalselteng 1                   | Kalselteng | 0,282     | 66,151   |
| PLTG Kalteng                   | Kalselteng | 1,000     | 80,384   |
| Kalsel FTP 1                   | Kaselteng  | 0,203     | -96,565  |
| Bangkanai                      | Kalselteng | 0,150     | -114,340 |

Dari data *observeability*  $\delta$  dilihat bahwa dengan frekuensi 1,28536 dimana merupakan mode *local area* ,hal ini dapat dilihat bahwa hanya meliputi pembangkit dari area Kalselteng saja yang *observeable* dan selain itu berdasarkan sudut dari mangitude dimana sudut antar

pembangkit saling berlawanan atau *counter phase* sehingga dapat dikatakan merupakan mode osilasi lokal pada area Kalselteng. Jika dikelompokkan berdasarkan sudutnya dapat dilihat bahwa pembangkit Bangkanai dan Kalselteng berosilasi terhadap PLTG Kalteng. Kalselteng 1, Sampit, Pulpis. Bentuk fasor dapat diperlihatkan sebagai berikut :



**Gambar 4. 15** Phasor Plot *Observeability*  $\delta$  Mode 370

Selain berdasarkan *observeability* sudut rotor ( $\delta$ ) dapat pula dilihat berdasarkan *observeability* kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) yang ditampilkan sebagai berikut :

**Tabel 4. 43** *Observeability*  $\omega$  Mode 370

| <i>Observeability</i> $\omega$ |            |           |         |
|--------------------------------|------------|-----------|---------|
| Nama Pembangkit                | Area       | Magnitude | Angle   |
| Kalsel FTP 1                   | Kalselteng | 0,005     | 133,041 |
| Sampit                         | Kalselteng | 0,005     | 140,200 |
| Kalselteng 1                   | Kalselteng | 0,007     | 157,296 |
| PLTG Kalteng                   | Kalselteng | 0,026     | 172,421 |
| Pulpis                         | Kalselteng | 0,005     | -3,590  |
| Bangkanai                      | Kalselteng | 0,004     | -20,209 |

Berdasarkan *observeability*  $\omega$  dapat dilihat bahwa menunjukkan hasil yang sama dengan *observeability*  $\delta$  dimana berdasarkan informasi sudut magnitudenya dapat dikatakan mode 370 merupakan mode local *area* dimana hanya melibatkan pembangkit pada area Kalselteng.

#### 4.6.3 Participation factor (Mode 370)

Pada subbab ini akan ditampilkan *participation factor* dari mode 370 untuk mengetahui *state variable* dan generator mana saja yang memiliki kontribusi terhadap nilai *eigenvalue* pada mode 370 dimana akan ditampilkan *participation factor*  $\delta$  dan *participation factor*  $\omega$  karena pada mode elektromekanikal erat kaitan dengan rotor sehingga *participation factor* terbesar berasal dari  $\delta$  dan  $\omega$

**Tabel 4. 44** *Participation factor*  $\delta$  Mode 370

| <i>Participation factor</i> $\delta$ |            |           |
|--------------------------------------|------------|-----------|
| Nama Pembangkit                      | Area       | Magnitude |
| PLTG Kalteng                         | Kalselteng | 0,952     |

**Tabel 4. 45** *Participation factor*  $\omega$  Mode 370

| <i>Participation factor</i> $\delta$ |            |           |
|--------------------------------------|------------|-----------|
| Nama Pembangkit                      | Area       | Magnitude |
| PLTG Kalteng                         | Kalselteng | 1         |

Tabel diatas menampilkan *participation factor* dari mode yang bersangkutan, dapat dilihat *participation factor* terbesar adalah berasal dari state yang berhubungan erat dengan rotor dikarenakan merupakan mode elektromekanikal, berdasarkan *participation factornya* dapat dilihat bahwa *eigenvalue* untuk mode 370 lebih sensitif terhadap generator pada area Kalselteng lebih tepatnya pada PLTG Kalteng. Berdasarkan informasi dari *observeability* dan *participation factor* dimana PLTG Kalteng merupakan pembangkit yang paling *observeable* dan dengan *participation factor* terbesar maka pembangkit PLTG Kalteng akan lebih rentan terhadap gangguan jika dibandingkan dengan pembangkit lain pada area Kalselteng lain untuk mode 370 dikarenakan merupakan mode *local-area*.

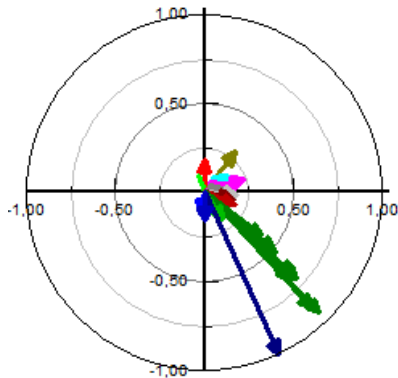
#### 4.6.4 Mode Shape Eigenvalue (Mode 434)

Pada mode 434 memiliki *damping ratio* sebesar 3,880%. Mode 370 memiliki *mode shape* atau *observeability* dimana dapat dilihat berdasarkan *observeability* sudut rotor ( $\delta$ ) dan *observeability* kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) sebagai berikut :

**Tabel 4. 46** *Observeability*  $\delta$  Mode 434

| <i>Observeability</i> $\delta$ |            |           |         |
|--------------------------------|------------|-----------|---------|
| Nama Pembangkit                | Area       | Magnitude | Angle   |
| Bangkanai                      | Kalselteng | 0,229     | 18,460  |
| Asam-Asam                      | Kalselteng | 0,161     | 36,761  |
| Kalselteng 2                   | Kalselteng | 0,158     | 38,040  |
| PLTU 400 MW Batulicin          | Kalselteng | 0,285     | 53,133  |
| PLTA Tabang                    | Kaltimra   | 0,182     | 90,664  |
| Kalselteng 1                   | Kalselteng | 0,183     | -3,166  |
| Pulpis                         | Kalselteng | 0,153     | -14,077 |
| Sampit                         | Kalselteng | 0,186     | -20,158 |
| PLTU Kalbar 2                  | Kalbar     | 0,399     | -37,129 |
| PLTU Parit Baru                | Kalbar     | 0,505     | -39,731 |
| Kalbar Peaker 1                | Kalbar     | 0,520     | -40,478 |
| MPP Kalbar                     | Kalbar     | 0,520     | -40,478 |
| PLTU Kalbar 3                  | Kalbar     | 0,704     | -43,152 |
| PLTU Kalbar 1                  | Kalbar     | 0,694     | -45,141 |
| PLTU Kurakura 1                | Kalbar     | 0,686     | -45,345 |
| PLTU 400 MW Sekadau            | Kalbar     | 0,935     | -46,246 |
| PLTA Kaltara                   | Kaltimra   | 1,000     | -65,356 |
| Kaltim MT                      | Kaltimra   | 0,159     | -88,276 |

Dari data *observeability*  $\delta$  dapat dilihat bahwa mode 434 merupakan mode *inter-area* karena meliputi pembangkit dari ketiga area yaitu Kaltimra, Kalselteng, dan Kalbar. Jika dikelompokan berdasarkan sudut magnitudenya dapat dilihat bahwa pembangkit pada area Kaltimra, Kalselteng, dan Kalbar saling berosilasi terhadap pembangkit lain dari kedua area lainnya, dan berdasarkan magnitudenya PLTA Kaltara menjadi pembangkit yang paling *observeable*. Bentuk fasor dapat diperlihatkan sebagai berikut :



**Gambar 4. 16** Phasor Plot *Observeability*  $\delta$  Mode 434

Selain berdasarkan *observeability* sudut rotor ( $\delta$ ) dapat pula dilihat berdasarkan *observeability* kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) yang ditampilkan sebagai berikut :

**Tabel 4. 47** *Observeability*  $\omega$  Mode 434

| <i>Observeability</i> $\omega$ |            |           |          |
|--------------------------------|------------|-----------|----------|
| Nama Pembangkit                | Area       | Magnitude | Angle    |
| PLTA Kaltara                   | Kaltimra   | 0,011     | 24,645   |
| PLTU 400 MW Sekadau            | Kalbar     | 0,010     | 48,178   |
| PLTU Kurakura 1                | Kalbar     | 0,007     | 50,383   |
| PLTU Kalbar 1                  | Kalbar     | 0,007     | 50,605   |
| PLTU Kalbar 3                  | Kalbar     | 0,007     | 53,208   |
| PLTU Parit Baru                | Kalbar     | 0,007     | 53,922   |
| Kalbar Peaker 1                | Kalbar     | 0,005     | 59,355   |
| MPP Kalbar                     | Kalbar     | 0,005     | 59,355   |
| PLTU Kalbar 2                  | Kalbar     | 0,003     | 69,047   |
| Kalselteng 1                   | Kalselteng | 0,002     | 153,806  |
| Bangkanai                      | Kalselteng | 0,003     | 156,073  |
| PLTU 400 MW Batulicin          | Kalselteng | 0,005     | 172,760  |
| Asam-Asam                      | Kalselteng | 0,003     | 177,274  |
| Kalselteng 2                   | Kalselteng | 0,003     | 178,390  |
| PLTA Tabang                    | Kaltimra   | 0,005     | -159,373 |



Berdasarkan *observeability*  $\omega$  dapat dilihat bahwa menunjukan hasil yang sama dengan *observeability*  $\delta$  dimana berdasarkan informasi sudut magnitudenya dapat dikatakan mode 434 merupakan mode *inter-area* dimana melibatkan ketiga area yaitu Kaltimra, Kalselteng, dan Kalbar.

#### 4.6.5 Participation factor (Mode 434)

Pada subbab ini akan ditampilkan *participation factor* dari mode 434 untuk mengetahui *state variable* dan generator mana saja yang memiliki kontribusi terhadap nilai *eigenvalue* pada mode 434 dimana akan ditampilkan *participation factor*  $\delta$  dan *participation factor*  $\omega$  karena pada mode elektromekanikal erat kaitan dengan rotor sehingga *participation factor* terbesar berasal dari  $\delta$  dan  $\omega$

**Tabel 4. 48** *Participation factor*  $\delta$  Mode 434

| <i>Participation factor</i> $\delta$ |            |           |
|--------------------------------------|------------|-----------|
| Nama Pembangkit                      | Area       | Magnitude |
| PLTA Kaltara                         | Kaltimra   | 1         |
| PLTU 400 MW<br>Sekadau               | Kalbar     | 0,553     |
| PLTU 400 MW<br>Batulicin             | Kalselteng | 0,127     |

**Tabel 4. 49** *Participation factor*  $\omega$  Mode 434

| <i>Participation factor</i> $\delta$ |            |           |
|--------------------------------------|------------|-----------|
| Nama Pembangkit                      | Area       | Magnitude |
| PLTA Kaltara                         | Kaltimra   | 0,754     |
| PLTU 400 MW<br>Sekadau               | Kalbar     | 0,512     |
| PLTU 400 MW<br>Batulicin             | Kalselteng | 0,196     |

Tabel diatas menampilkan *participation factor* dari mode yang bersangkutan, dapat dilihat *participation factor* terbesar adalah berasal dari state yang berhubungan erat dengan rotor dikarenakan merupakan mode elektromekanikal, berdasarkan *participation factornya* dapat dilihat bahwa *eigenvalue* untuk mode 434 lebih sensitif terhadap generator pada area Kalselteng, Kaltimra dan Kalbar lebih tepatnya pada PLTA Kaltara. Berdasarkan informasi dari *observeability* dan *participation factor* dimana PLTA Kaltara merupakan pembangkit yang paling *observeable* dan dengan *participation factor* terbesar maka pembangkit PLTA Kaltara

akan lebih rentan terhadap gangguan jika dibandingkan dengan pembangkit pada area Kaltimra, Kalselteng dan Kalbar lain untuk mode 434 dikarenakan merupakan mode *inter-area*.

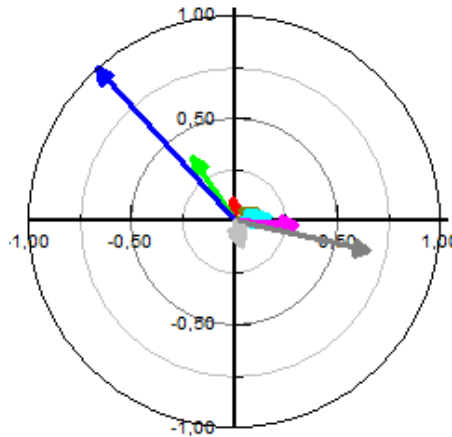
#### 4.6.6 Mode Shape Eigenvalue (Mode 426)

Pada mode 426 memiliki *damping ratio* sebesar 4,854%. Mode 426 memiliki *mode shape* atau *observeability* dimana dapat dilihat berdasarkan *observeability* sudut rotor ( $\delta$ ) dan *observeability* kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) sebagai berikut :

**Tabel 4. 50** *Observeability*  $\delta$  Mode 426

| <i>Observeability</i> $\delta$ |            |           |         |
|--------------------------------|------------|-----------|---------|
| Nama Pembangkit                | Area       | Magnitude | Angle   |
| PLTU 400 MW Bandara            | Kalselteng | 0,169     | 5,579   |
| Kalsel FTP 1                   | Kalselteng | 0,176     | 7,781   |
| PLTG Kalsel                    | Kalselteng | 0,154     | 8,375   |
| PLTA Kusan                     | Kalselteng | 0,164     | 10,565  |
| PLTA Kaltara                   | Kaltimra   | 0,121     | 26,930  |
| Kalselteng 1                   | Kalselteng | 0,368     | 123,099 |
| Bangkanai                      | Kalselteng | 1,000     | 132,036 |
| Kalselteng 2                   | Kalselteng | 0,300     | -2,939  |
| Asam-Asam                      | Kalselteng | 0,299     | -4,398  |
| PLTU 400 MW Batulicin          | Kalselteng | 0,667     | -12,538 |
| PLTU 400 MW Sekadau            | Kalbar     | 0,130     | -73,191 |

Dari data *observeability*  $\delta$  dapat dilihat bahwa mode 426 merupakan mode *inter-area* karena meliputi pembangkit dari ketiga area yaitu Kaltimra, Kalselteng, dan Kalbar. Jika dikelompokkan berdasarkan sudut magnitudenya dapat dilihat bahwa pembangkit pada area Kalselteng dalam hal ini Bangkanai dan Kalselteng 1 saling beresilasi terhadap pembangkit lain dari kedua area lainnya, dan berdasarkan magnitudenya Bangkanai menjadi pembangkit yang paling *observeable*. Bentuk fasor dapat diperlihatkan sebagai berikut :



**Gambar 4. 17** Phasor Plot *Observeability*  $\delta$  Mode 426

Selain berdasarkan *observeability* sudut rotor ( $\delta$ ) dapat pula dilihat berdasarkan *observeability* kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) yang ditampilkan sebagai berikut :

**Tabel 4. 51** *Observeability*  $\omega$  Mode 426

| <i>Observeability</i> $\omega$ |            |           |          |
|--------------------------------|------------|-----------|----------|
| Nama Pembangkit                | Area       | Magnitude | Angle    |
| PLTU 400 MW Sekadau            | Kalbar     | 0,002     | 8,568    |
| PLTU 400 MW Batulicin          | Kalselteng | 0,011     | 79,299   |
| Asam-Asam                      | Kalselteng | 0,005     | 86,862   |
| Kalselteng 2                   | Kalselteng | 0,005     | 88,453   |
| PLTU 400 MW Bandara            | Kalselteng | 0,002     | 97,145   |
| Kalsel FTP 1                   | Kalselteng | 0,003     | 99,770   |
| PLTA Kusan                     | Kalselteng | 0,002     | 102,984  |
| Bangkanai                      | Kalselteng | 0,017     | -133,947 |
| Kalselteng 1                   | Kalselteng | 0,006     | -140,553 |

Berdasarkan *observeability*  $\omega$  dapat dilihat bahwa menunjukan hasil yang sama dengan *observeability*  $\delta$  dimana berdasarkan informasi

sudut magnitudenya dapat dikatakan mode 426 merupakan mode *inter-area* .

#### 4.6.7 Participation factor ( Mode 426)

Pada subbab ini akan ditampilkan *participation factor* dari mode 426 untuk mengetahui *state variable* dan generator mana saja yang memiliki kontribusi terhadap nilai *eigenvalue* pada mode 426 dimana akan ditampilkan *participation factor*  $\delta$  dan *participation factor*  $\omega$  karena pada mode elektromekanikal erat kaitan dengan rotor sehingga *participation factor* terbesar berasal dari  $\delta$  dan  $\omega$

**Tabel 4. 52 Participation factor  $\delta$  Mode 426**

| Participation factor $\delta$ |            |           |
|-------------------------------|------------|-----------|
| Nama Pembangkit               | Area       | Magnitude |
| PLTU 400 MW Batulicin         | Kalselteng | 0,922     |
| Bangkanai                     | Kalselteng | 0,308     |

**Tabel 4. 53 Participation factor  $\omega$  Mode 426**

| Participation factor $\omega$ |            |           |
|-------------------------------|------------|-----------|
| Nama Pembangkit               | Area       | Magnitude |
| PLTU 400 MW Batulicin         | Kalselteng | 1         |
| Bangkanai                     | Kalselteng | 0,373     |

Tabel diatas menampilkan *participation factor* dari mode yang bersangkutan, dapat dilihat *participation factor* terbesar adalah berasal dari state yang berhubungan erat dengan rotor dikarenakan merupakan mode elektromekanikal, berdasarkan *participation factornya* dapat dilihat bahwa *eigenvalue* untuk mode 426 lebih sensitif terhadap generator pada area Kalselteng lebih tepatnya pada Bangkanai. Berdasarkan informasi dari *observeability* dan *participation factor* dimana Bangkanai merupakan pembangkit yang paling *observeable* dan dengan *participation factor* terbesar maka pembangkit Bangkanai akan lebih rentan terhadap gangguan jika dibandingkan dengan pembangkit pada area Kaltimra, Kalselteng dan Kalbar lain untuk mode 426 dikarenakan merupakan mode *inter-area*.

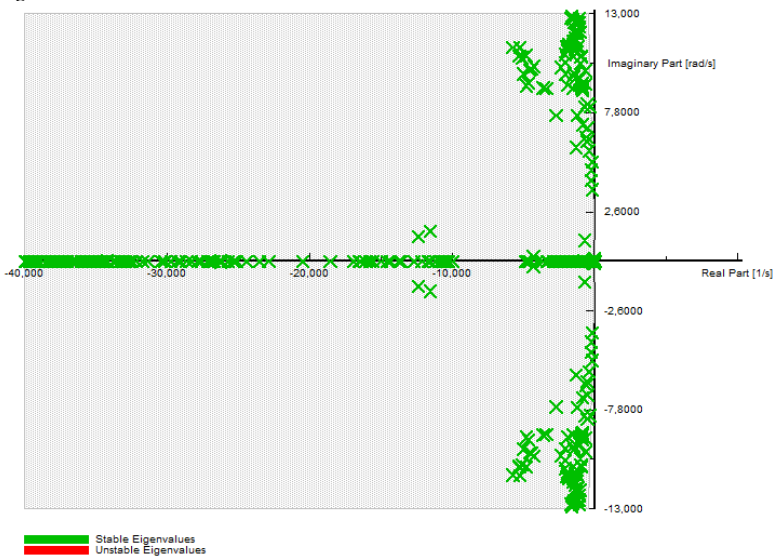
## 4.7 Modal analysis Kelistrikan Kalimantan Tahun 2040

Pada tahun 2040 sistem Kelistrikan Kalimantan sudah saling terhubung atau terinterkoneksi dengan sistem *backbone* 500 kV dan pada

tahun 2040 sistem transmisi HVDC menuju Jawa beroperasi dengan mengirimkan daya sebesar 1000 MW menuju beban di Jawa dengan jarak 500 km. Pada tahun 2040 terdapat penambahan lima pembangkit PLTU 400 MW pada area Kalselteng dan Kaltimra dan tiga PLTG 100 MW dengan data beban sesuai dengan data beban.

#### 4.7.1 *Eigenvalue* Kelistrikan Kalimantan Tahun 2040

*Modal analysis* pada sistem kelistrikan Kalimantan pada tahun 2040 menghasilkan 1077 nilai *eigenvalue* dimana seluruh nilai *eigenvalue* menunjukkan bahwa sistem stabil dikarenakan seluruh bagian *real* dari nilai *eigenvalue* bernilai negatif, berikut adalah plot seluruh nilai *eigenvalue* :



**Gambar 4. 18** Plot *Eigenvalue* Kelistrikan Kalimantan Tahun 2040

Dari 1077 nilai *eigenvalue* ditampilkan beberapa nilai *eigenvalue* dengan *damping ratio* dibawah 10% dan selanjutnya akan di analisis nilai *eigenvalue* dengan *damping ratio* 5% hal ini dilakukan karena dengan *damping ratio* dibawah 5 % waktu yang dibutuhkan sistem untuk kembali ke dalam kondisi *steady state* akan semakin lama sehingga jika terjadi gangguan lain pada saat sistem menuju *steady state* akan menyebabkan sistem beresiko tinggi untuk *breakdown*.

**Tabel 4. 54** *Eigenvalue* dengan Damping Dibawah 10% Tahun 2040

| Mode       | Real            | Imaginer       | Frequency      | Damping Ratio |
|------------|-----------------|----------------|----------------|---------------|
| <b>465</b> | <b>-0,18641</b> | <b>5,20862</b> | <b>0,82898</b> | <b>3,577%</b> |
| <b>400</b> | <b>-0,33745</b> | <b>8,10213</b> | <b>1,28949</b> | <b>4,161%</b> |
| 471        | -0,19575        | 3,76468        | 0,59917        | 5,193%        |
| 467        | -0,26705        | 4,79414        | 0,76301        | 5,562%        |
| 398        | -0,50860        | 8,30070        | 1,32110        | 6,116%        |
| 379        | -0,60984        | 9,31149        | 1,48197        | 6,535%        |
| 469        | -0,28425        | 4,24568        | 0,67572        | 6,680%        |
| 363        | -0,68651        | 10,01598       | 1,59409        | 6,838%        |
| 459        | -0,42618        | 5,81126        | 0,92489        | 7,314%        |

Pada tahun 2040 dapat dilihat terdapat dua nilai *eigenvalue* dengan *damping ratio* dibawah 5% sehingga merupakan nilai *eigenvalue* yang kritis atau sudah mendekati sumbu positif sehingga perlu dilakukan analisis pembangkit mana saja yang berpengaruh pada *eigenvalue* ini.

#### 4.7.2 Mode Shape *Eigenvalue* (Mode 465)

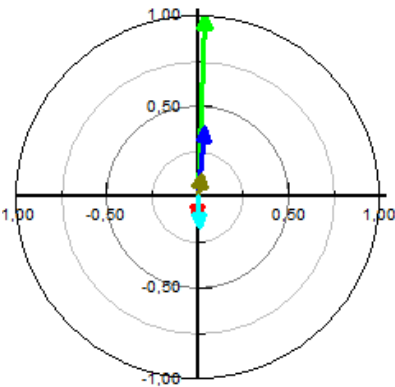
Pada mode 465 memiliki *damping ratio* sebesar 3,577% dengan frekuensi 0,82898. Mode 465 memiliki *mode shape* atau *observeability* dimana dapat dilihat berdasarkan *observeability* sudut rotor ( $\delta$ ) dan *observeability* kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) sebagai berikut :

**Tabel 4. 55** *Observeability*  $\delta$  Mode 465

| <i>Observeability</i> $\delta$ |            |           |         |
|--------------------------------|------------|-----------|---------|
| Nama Pembangkit                | Area       | Magnitude | Angle   |
| Bangkanai                      | Kalselteng | 1,000     | 87,797  |
| Kalselteng 1                   | Kalselteng | 0,382     | 84,200  |
| PLTU 400 MW<br>Batulicin       | Kalselteng | 0,168     | -86,531 |

Dari data *observeability*  $\delta$  dilihat bahwa dengan frekuensi 0,82898 dimana merupakan mode *inter area* ,hal ini dapat dilihat bahwa hanya meliputi pembangkit dari area Kalselteng saja yang *observeable* dan selain itu berdasarkan sudut dari mangitude dimana sudut antar pembangkit saling berlawanan atau *counter phase* sehingga dapat dikatakan merupakan mode osilasi lokal pada area Kalselteng. Jika dikelompokan berdasarkan sudutnya dapat dilihat bahwa pembangkit

Bangkanai dan Kalselteng 1 berosilasi terhadap PLTU 400 MW Batulicin Bentuk fasor dapat diperlihatkan sebagai berikut :



**Gambar 4. 19** Phasor Plot *Observeability*  $\delta$  Mode 465

Selain berdasarkan *observeability* sudut rotor ( $\delta$ ) dapat pula dilihat berdasarkan *observeability* kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) yang ditampilkan sebagai berikut :

**Tabel 4. 56** *Observeability*  $\omega$  Mode 465

| <i>Observeability</i> $\omega$ |            |           |          |
|--------------------------------|------------|-----------|----------|
| Nama Pembangkit                | Area       | Magnitude | Angle    |
| Bangkanai                      | Kalselteng | 0,016     | -179,672 |
| Kalselteng 1                   | Kalselteng | 0,006     | 177,462  |
| PLTU 400 MW Batulicin          | Kalselteng | 0,003     | 2,582    |

Berdasarkan *observeability*  $\omega$  dapat dilihat bahwa menunjukan hasil yang sama dengan *observeability*  $\delta$  dimana berdasarkan informasi sudut magnitudenya dapat dikatakan mode 465 merupakan mode *local-area* dimana melibatkan area Kalselteng saja.

**4.7.3    *Participation factor (Mode 465)***

Pada subbab ini akan ditampilkan *participation factor* dari mode 312 untuk mengetahui *state variable* dan generator mana saja yang memiliki kontribusi terhadap nilai *eigenvalue* pada mode 312 dimana akan ditampilkan *participation factor*  $\delta$  dan *participation factor*  $\omega$  karena

pada mode elektromekanikal erat kaitan dengan rotor sehingga *participation factor* terbesar berasal dari  $\delta$  dan  $\omega$

**Tabel 4. 57** *Participation factor*  $\delta$  Mode 465

| <i>Participation factor</i> $\delta$ |            |           |
|--------------------------------------|------------|-----------|
| Nama Pembangkit                      | Area       | Magnitude |
| Bangkitanai                          | Kalselteng | 0,844     |
| Kalselteng 1                         | Kalselteng | 0,244     |
| PLTU 400 MW<br>Batulicin             | Kalselteng | 0,211     |

**Tabel 4. 58** *Participation factor*  $\omega$  Mode 465

| <i>Participation factor</i> $\omega$ |            |           |
|--------------------------------------|------------|-----------|
| Nama Pembangkit                      | Area       | Magnitude |
| Bangkitanai                          | Kalselteng | 1         |
| Kalselteng 1                         | Kalselteng | 0,268     |
| PLTU 400 MW<br>Batulicin             | Kalselteng | 0,244     |

Tabel diatas menampilkan *participation factor* dari mode yang bersangkutan, dapat dilihat *participation factor* terbesar adalah berasal dari state yang berhubungan erat dengan rotor dikarenakan merupakan mode elektromekanikal, berdasarkan *participation factornya* dapat dilihat bahwa *eigenvalue* untuk mode 465 lebih sensitif terhadap generator pada area Kalselteng lebih tepatnya pada Bangkanai. Berdasarkan informasi dari *observeability* dan *participation factor* dimana Bangkanai merupakan pembangkit yang paling *observeable* dan dengan *participation factor* terbesar maka pembangkit Bangkanai akan lebih rentan terhadap gangguan jika dibandingkan dengan pembangkit pada area,Kalselteng lain untuk mode 465 dikarenakan merupakan mode *local-area*

#### 4.7.4 Mode Shape Eigenvalue (Mode 400)

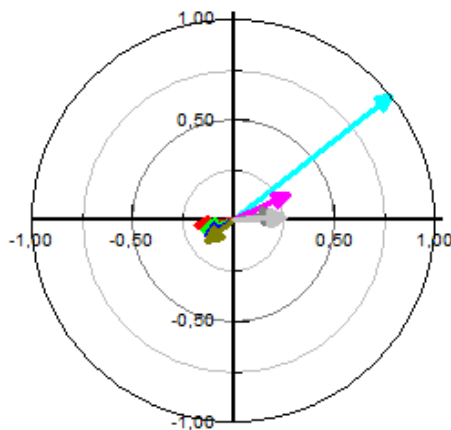
Pada mode 400 memiliki *damping ratio* sebesar 4,161% dengan frekuensi 1,28949. Mode 400 memiliki *mode shape* atau *observeability* dimana dapat dilihat berdasarkan *observeability* sudut rotor ( $\delta$ ) dan *observeability* kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) sebagai berikut :



**Tabel 4. 59** *Observeability*  $\delta$  Mode 400

| <i>Observeability</i> $\delta$ |            |           |          |
|--------------------------------|------------|-----------|----------|
| Nama Pembangkit                | Area       | Magnitude | Angle    |
| Pulpis                         | Kalselteng | 0,216     | 42,884   |
| Sampit                         | Kalselteng | 0,199     | 50,039   |
| Kalselteng 1                   | Kalselteng | 0,282     | 66,151   |
| PLTG Kalteng                   | Kalselteng | 1,000     | 80,384   |
| Kalsel FTP 1                   | Kalselteng | 0,203     | -96,565  |
| Bangkanai                      | Kalselteng | 0,150     | -114,340 |

Dari data *observeability*  $\delta$  dilihat bahwa dengan frekuensi 1,28949 dimana merupakan mode *local area* ,hal ini dapat dilihat bahwa hanya meliputi pembangkit dari area Kalselteng saja yang *observeable* dan selain itu berdasarkan sudut dari mangitude dimana sudut antar pembangkit saling berlawanan atau *counter phase* sehingga dapat dikatakan merupakan mode osilasi lokal pada area Kalselteng. Jika dikelompokan berdasarkan sudutnya dapat dilihat bahwa pembangkit Bangkanai dan Kalsel FTP 1 berosilasi terhadap PLTG Kalteng.Kalselteng 1, Sampit, Pulpis. Dengan PLTG Kalteng sebagai pembangkit yang paling besar magnitudenya atau paling *observeable* Bentuk fasor dapat diperlihatkan sebagai berikut :



**Gambar 4. 20** Phasor Plot *Observeability*  $\delta$  Mode 400

Selain berdasarkan *observeability* sudut rotor ( $\delta$ ) dapat pula dilihat berdasarkan *observeability* kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) yang ditampilkan sebagai berikut :

**Tabel 4. 60** *Observeability*  $\omega$  Mode 400

| <i>Observeability</i> $\omega$ |            |           |         |
|--------------------------------|------------|-----------|---------|
| Nama Pembangkit                | Area       | Magnitude | Angle   |
| Kalselteng 1                   | Kalselteng | 0,007     | 92,141  |
| PLTG Kalteng                   | Kalselteng | 0,005     | 96,894  |
| Sampit                         | Kalselteng | 0,007     | 114,813 |
| Pulpis                         | Kalselteng | 0,025     | 130,410 |
| Bangkanai                      | Kalselteng | 0,025     | 130,410 |
| Kalsel FTP 1                   | Kalselteng | 0,004     | -63,617 |

Berdasarkan *observeability*  $\omega$  dapat dilihat bahwa menunjukkan hasil yang sama dengan *observeability*  $\delta$  dimana berdasarkan informasi sudut magnitudenya dapat dikatakan mode 400 merupakan mode *local-area* dimana hanya melibatkan pembangkit pada area Kalselteng.

#### 4.7.5 *Participation factor* (Mode 400)

Pada subbab ini akan ditampilkan *participation factor* dari mode 400 untuk mengetahui *state variable* dan generator mana saja yang memiliki kontribusi terhadap nilai *eigenvalue* pada mode 400 dimana akan ditampilkan *participation factor*  $\delta$  dan *participation factor*  $\omega$  karena pada mode elektromekanikal erat kaitan dengan rotor sehingga *participation factor* terbesar berasal dari  $\delta$  dan  $\omega$

**Tabel 4. 61** *Participation factor*  $\delta$  Mode 400

| <i>Participation factor</i> $\delta$ |            |           |
|--------------------------------------|------------|-----------|
| Nama Pembangkit                      | Area       | Magnitude |
| PLTG Kalteng                         | Kalselteng | 0,952     |

**Tabel 4. 62** *Participation factor*  $\omega$  Mode 400

| <i>Participation factor</i> $\omega$ |            |           |
|--------------------------------------|------------|-----------|
| Nama Pembangkit                      | Area       | Magnitude |
| PLTG Kalteng                         | Kalselteng | 0,952     |

Tabel diatas menampilkan *participation factor* dari mode yang bersangkutan, dapat dilihat *participation factor* terbesar adalah berasal dari state yang berhubungan erat dengan rotor dikarenakan merupakan mode elektromekanikal, berdasarkan *participation factornya* dapat dilihat bahwa *eigenvalue* untuk mode 400 lebih sensitif terhadap generator pada area Kalselteng lebih tepatnya pada PLTG Kalteng. Berdasarkan informasi dari *observeability* dan *participation factor* dimana PLTG

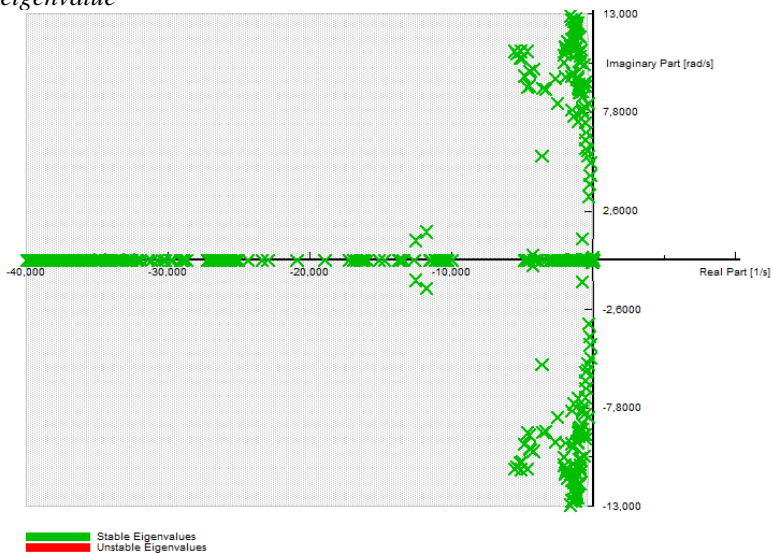
Kalteng merupakan pembangkit yang paling *observeable* dan dengan *participation factor* terbesar maka pembangkit PLTG Kalteng akan lebih rentan terhadap gangguan jika dibandingkan dengan pembangkit pada area Kalselteng lain untuk mode 400 dikarenakan merupakan mode *local-area*

## 4.8 Modal analysis Kelistrikan Kalimantan Tahun 2045

Pada tahun 2045 sistem Kelistrikan Kalimantan sudah saling terhubung atau terinterkoneksi dengan sistem *backbone* 500 kV dan pada tahun 2045 sistem transmisi HVDC menuju Jawa beroperasi dengan mengirimkan daya sebesar 1000 MW menuju beban di Jawa dengan jarak 500 km. Pada tahun 2045 terdapat penambahan tujuh pembangkit PLTU 400 MW pada area Kalselteng dan Kaltimra dan 13 PLTG 100 MW dengan data beban sesuai dengan data beban.

### 4.8.1 Eigenvalue Kelistrikan Kalimantan Tahun 2045

*Modal analysis* pada sistem kelistrikan Kalimantan pada tahun 2040 menghasilkan 1300 nilai *eigenvalue* dimana seluruh nilai *eigenvalue* menunjukkan bahwa sistem stabil dikarenakan seluruh bagian *real* dari nilai *eigenvalue* bernilai negatif, berikut adalah plot seluruh nilai *eigenvalue*



**Gambar 4. 21** Plot *Eigenvalue* Kelistrikan Kalimantan Tahun 2045

Dari 1300 nilai *eigenvalue* ditampilkan beberapa nilai *eigenvalue* dengan *damping ratio* dibawah 10% dan selanjutnya akan di analisis nilai *eigenvalue* dengan *damping ratio* 5% hal ini dilakukan karena dengan *damping ratio* dibawah 5 % waktu yang dibutuhkan sistem untuk kembali ke dalam kondisi *steady state* akan semakin lama sehingga jika terjadi gangguan lain pada saat sistem menuju *steady state* akan menyebabkan sistem beresiko tinggi untuk *breakdown*.

**Tabel 4. 63** *Eigenvalue* dengan Damping Dibawah 10% Tahun 2045

| Mode       | Real            | Imaginer       | Frequency      | Damping Ratio |
|------------|-----------------|----------------|----------------|---------------|
| <b>558</b> | <b>-0,18577</b> | <b>5,17635</b> | <b>0,82384</b> | <b>3,587%</b> |
| <b>479</b> | <b>-0,37836</b> | <b>8,28527</b> | <b>1,31864</b> | <b>4,562%</b> |
| <b>564</b> | <b>-0,22180</b> | <b>4,47605</b> | <b>0,71239</b> | <b>4,949%</b> |
| 449        | -0,52918        | 9,19535        | 1,46349        | 5,745%        |
| 566        | -0,23866        | 4,01117        | 0,63840        | 5,939%        |
| 441        | -0,59125        | 9,43414        | 1,50149        | 6,255%        |
| 413        | -0,64917        | 10,34734       | 1,64683        | 6,261%        |
| 451        | -0,62121        | 9,22088        | 1,46755        | 6,722%        |
| 519        | -0,37343        | 5,48722        | 0,87332        | 6,790%        |

Pada tahun 2045 dapat dilihat terdapat tiga nilai *eigenvalue* dengan *damping ratio* dibawah 5% sehingga merupakan nilai *eigenvalue* yang kritis atau sudah mendekati sumbu positif sehingga perlu dilakukan analisis pembangkit mana saja yang berpengaruh pada *eigenvalue* ini.

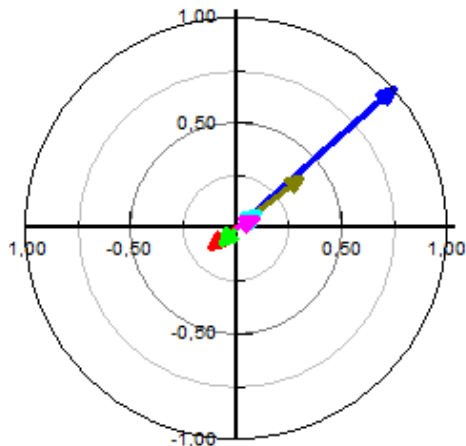
#### **4.8.2 Mode Shape *Eigenvalue* (Mode 558)**

Pada mode 558 memiliki *damping ratio* sebesar 3,587% dengan frekuensi 0,82384. Mode 558 memiliki *mode shape* atau *observeability* dimana dapat dilihat berdasrakan *observeability* sudut rotor ( $\delta$ ) dan *observeability* kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) sebagai berikut :

**Tabel 4. 64** *Observeability*  $\delta$  Mode 558

| <i>Observeability</i> $\delta$ |            |           |          |
|--------------------------------|------------|-----------|----------|
| Nama Pembangkit                | Area       | Magnitude | Angle    |
| Sampit                         | Kalselteng | 0,109     | 27,163   |
| PLTG Kalteng                   | Kaselteng  | 0,137     | 34,349   |
| Kalselteng 1                   | Kalselteng | 0,393     | 38,089   |
| Bangkanai                      | Kalselteng | 1,000     | 41,376   |
| PLTU 400 MW<br>Batulicin       | Kalselteng | 0,156     | -141,883 |

Dari data *observeability*  $\delta$  dilihat bahwa dengan frekuensi 0,82384 dimana merupakan mode *local area* ,hal ini dapat dilihat bahwa mode ini hanya meliputi pembangkit dari area Kalselteng saja yang *observeable* dan selain itu berdasarkan sudut dari mangitude dimana sudut antar pembangkit saling berlawanan atau *counter phase* sehingga dapat dikatakan merupakan mode osilasi lokal pada area Kalselteng. Jika dikelompokan berdasarkan sudutnya dapat dilihat bahwa pembangkit PLTU 400 MW Batulicin berosilasi terhadap PLTG Kalteng.Kalselteng 1, Sampit, Bangkanai. Dengan Bangkanai sebagai pembangkit yang paling besar magnitudenya atau paling *obsereveable* Bentuk fasor dapat diperlihatkan sebagai berikut :

**Gambar 4. 22** Phasor Plot *Observeability*  $\delta$  Mode 558

Selain berdasarkan *observeability* sudut rotor ( $\delta$ ) dapat pula dilihat berdasarkan *observeability* kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) yang ditampilkan sebagai berikut :

**Tabel 4. 65** *Observeability*  $\omega$  Mode 558

| <i>Observeability</i> $\omega$ |            |           |         |
|--------------------------------|------------|-----------|---------|
| Nama Pembangkit                | Area       | Magnitude | Angle   |
| Sampit                         | Kalselteng | 0,002     | 121,784 |
| PLTG Kalteng                   | Kaselteng  | 0,002     | 128,781 |
| Kalselteng 1                   | Kalselteng | 0,006     | 131,008 |
| Bangkanai                      | Kalselteng | 0,016     | 133,787 |
| PLTU 400 MW Batulicin          | Kalselteng | 0,003     | -51,889 |

Berdasarkan *observeability*  $\omega$  dapat dilihat bahwa menunjukkan hasil yang sama dengan *observeability*  $\delta$  dimana berdasarkan informasi sudut magnitudenya dapat dikatakan mode 558 merupakan mode local-area dimana hanya melibatkan pembangkit pada area Kalselteng.

#### 4.8.3 Participation factor ( Mode 558)

Pada subbab ini akan ditampilkan *participation factor* dari mode 312 untuk mengetahui *state variable* dan generator mana saja yang memiliki kontribusi terhadap nilai *eigenvalue* pada mode 312 dimana akan ditampilkan *participation factor*  $\delta$  dan *participation factor*  $\omega$  karena pada mode elektromekanikal erat kaitan dengan rotor sehingga *participation factor* terbesar berasal dari  $\delta$  dan  $\omega$ .

**Tabel 4. 66** *Participation factor*  $\delta$  Mode 558

| <i>Participation factor</i> $\delta$ |            |           |
|--------------------------------------|------------|-----------|
| Nama Pembangkit                      | Area       | Magnitude |
| Bangkanai                            | Kalselteng | 0,842     |
| Kalselteng 1                         | Kalselteng | 0,256     |
| PLTU 400 MW Batulicin                | Kalselteng | 0,171     |

**Tabel 4. 67** *Participation factor*  $\omega$  Mode 558

| <i>Participation factor</i> $\omega$ |            |           |
|--------------------------------------|------------|-----------|
| Nama Pembangkit                      | Area       | Magnitude |
| Bangkanai                            | Kalselteng | 1         |
| Kalselteng 1                         | Kalselteng | 0,282     |
| PLTU 400 MW Batulicin                | Kalselteng | 0,199     |

Tabel diatas menampilkan *participation factor* dari mode yang bersangkutan,. Berdasarkan *participation factornya* dapat dilihat bahwa *eigenvalue* untuk mode 558 lebih sensitif terhadap generator pada area Kalselteng lebih tepatnya pada Bangkanai. Berdasarkan informasi dari *observeability* dan *participation factor* dimana Bangkanai merupakan pembangkit yang paling *observeable* dan dengan *participation factor* terbesar maka pembangkit Bangkanai akan lebih rentan terhadap gangguan jika dibandingkan dengan pembangkit pada area Kalselteng lain untuk mode 558 dikarenakan merupakan mode *local-area*

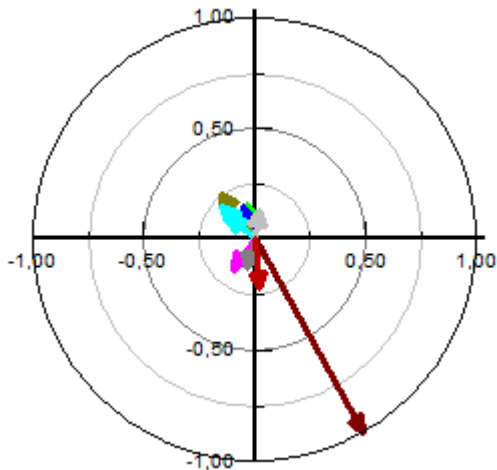
#### 4.8.4 Mode Shape Eigenvalue (Mode 479)

Pada mode 479 memiliki *damping ratio* sebesar 4,562% dengan frekuensi 1,31864 . Mode 479 memiliki *mode shape* atau *observeability* dimana dapat dilihat berdasrakan *observeability* sudut rotor ( $\delta$ ) dan *observeability* kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) sebagai berikut :

**Tabel 4. 68** *Observeability*  $\delta$  Mode 479

| <i>Observeability</i> $\delta$ |            |           |          |
|--------------------------------|------------|-----------|----------|
| Nama Pembangkit                | Area       | Magnitude | Angle    |
| Kalbar Peaker                  | Kalbar     | 0,161     | 109,204  |
| MPP Kalbar                     | Kalbar     | 0,161     | 109,204  |
| PLTU 400 MW Palangkaraya       | Kalselteng | 0,255     | 127,647  |
| Pulpis                         | Kalselteng | 0,210     | 134,655  |
| PLTG Kalteng                   | Kalselteng | 1,000     | -60,722  |
| Kalselteng 1                   | Kalselteng | 0,227     | -84,302  |
| Sampit                         | Kalselteng | 0,138     | -103,921 |
| LNG Air Upas                   | Kalbar     | 0,169     | -126,397 |

Dari data *observeability*  $\delta$  dapat dilihat bahwa mode 479 merupakan mode *inter-area* karena meliputi pembangkit dari dua area yaitu Kalselteng dan Kalbar. Jika dikelompokan berdasarkan sudut magnitudenya dapat dilihat bahwa pembangkit pada area Kaltimra dalam hal ini PLTG Kalteng, Kalselteng 1, Sampit, dan LNG Air Upas saling berosilasi terhadap pembangkit lain dari kedua area lainnya, dan berdasarkan magnitudenya PLTG Kalteng menjadi pembangkit yang paling *observeable*. Bentuk fasor dapat diperlihatkan sebagai berikut :



**Gambar 4. 23** Phasor Plot *Observeability*  $\delta$  Mode 479

Selain berdasarkan *observeability* sudut rotor ( $\delta$ ) dapat pula dilihat berdasarkan *observeability* kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) yang ditampilkan sebagai berikut :

**Tabel 4. 69** *Observeability*  $\omega$  Mode 479

| <i>Observeability</i> $\omega$ |            |           |          |
|--------------------------------|------------|-----------|----------|
| Nama Pembangkit                | Area       | Magnitude | Angle    |
| Kalselteng 1                   | Kalselteng | 0,006     | 8,133    |
| PLTG Kalteng                   | Kalselteng | 0,026     | 31,876   |
| Sampit                         | Kalselteng | 0,026     | 31,876   |
| LNG Air Upas                   | Kalbar     | 0,004     | -34,159  |
| Pulpis                         | Kalselteng | 0,006     | -132,729 |
| PLTU 400 MW Palangkaraya       | Kalselteng | 0,007     | -139,707 |
| Kalbar Peaker                  | Kalbar     | 0,004     | -158,010 |
| MPP Kalbar                     | Kalbar     | 0,004     | -158,010 |

Berdasarkan *observeability*  $\omega$  dapat dilihat bahwa menunjukan hasil yang sama dengan *observeability*  $\delta$  dimana berdasarkan informasi sudut magnitudenya dapat dikatakan mode 479 merupakan mode *inter-area* dimana melibatkan dua area yaitu Kalselteng, dan Kalbar.



#### 4.8.5 Participation factor ( Mode 479)

Pada subbab ini akan ditampilkan *participation factor* dari mode 312 untuk mengetahui *state variable* dan generator mana saja yang memiliki kontribusi terhadap nilai *eigenvalue* pada mode 312 dimana akan ditampilkan *participation factor*  $\delta$  dan *participation factor*  $\omega$  karena pada mode elektromekanikal erat kaitan dengan rotor sehingga *participation factor* terbesar berasal dari  $\delta$  dan  $\omega$

**Tabel 4. 70** *Participation factor*  $\delta$  Mode 479

| Observeability $\delta$  |            |           |         |
|--------------------------|------------|-----------|---------|
| Nama Pembangkit          | Area       | Magnitude | Angle   |
| PLTG Kalteng             | Kalselteng | 1,000     | -60,722 |
| PLTU 400 MW Palangkaraya | Kalselteng | 0,255     | 127,647 |

**Tabel 4. 71** *Participation factor*  $\omega$  Mode 479

| Observeability $\delta$  |            |           |         |
|--------------------------|------------|-----------|---------|
| Nama Pembangkit          | Area       | Magnitude | Angle   |
| PLTG Kalteng             | Kalselteng | 1,000     | -60,722 |
| PLTU 400 MW Palangkaraya | Kalselteng | 0,255     | 127,647 |

Tabel diatas menampilkan *participation factor* dari mode yang bersangkutan, dapat dilihat *participation factor* terbesar adalah berasal dari state yang berhubungan erat dengan rotor karenakan merupakan mode elektromekanikal, berdasarkan *participation factornya* dapat dilihat bahwa *eigenvalue* untuk mode 479 lebih sensitif terhadap generator pada area Kalselteng lebih tepatnya pada PLTG Kalteng. Berdasarkan informasi dari *observeability* dan *participation factor* dimana PLTG Kalteng merupakan pembangkit yang paling *observeable* dan dengan *participation factor* terbesar maka pembangkit PLTG Kalteng akan lebih rentan terhadap gangguan jika dibandingkan dengan pembangkit pada area Kalselteng dan Kalbar lain untuk mode 479 dikarenakan merupakan mode *inter-area*.

#### 4.8.6 Mode Shape Eigenvalue (Mode 564)

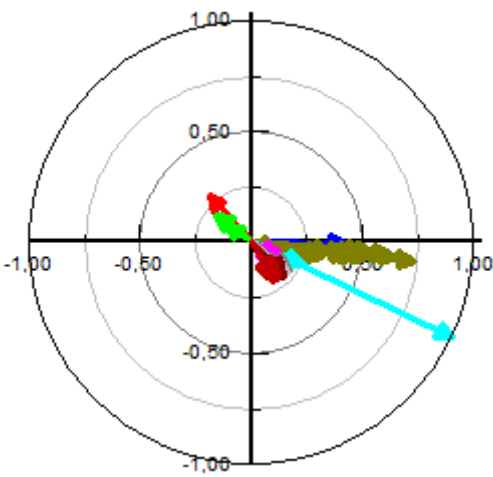
Pada mode 370 memiliki *damping ratio* sebesar 3,880% . Mode 564 memiliki *mode shape* atau *observeability* dimana dapat dilihat berdasarkan *observeability* sudut rotor ( $\delta$ ) dan *observeability* kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) sebagai berikut :

**Tabel 4. 72** *Observeability*  $\delta$  Mode 564

| <i>Participation factor</i> $\delta$ |            |           |         |
|--------------------------------------|------------|-----------|---------|
| Nama Pembangkit                      | Area       | Magnitude | Angle   |
| PLTA Tabang                          | Kaltimra   | 0,285     | 132,810 |
| PLTU 400 MW Kota Bangun              | Kaltimra   | 0,141     | 145,273 |
| PLTA Kusan                           | Kalselteng | 0,502     | -4,713  |
| LNG Amuntai                          | Kalselteng | 0,543     | -4,817  |
| Kalsel FTP 1                         | Kalselteng | 0,617     | -4,945  |
| LNG Barikin                          | Kalselteng | 0,538     | -4,965  |
| LNG Bati                             | Kalselteng | 0,520     | -5,529  |
| Kalselteng 2                         | Kalselteng | 0,545     | -5,804  |
| PLTG Kalsel                          | Kalselteng | 0,463     | -5,928  |
| PLTU 400 MW Tanjung                  | Kalselteng | 0,654     | -6,134  |
| Asam-Asam                            | Kalselteng | 0,547     | -6,434  |
| PLTU 400 MW Rantau                   | Kalselteng | 0,522     | -6,688  |
| PLTU 400 MW Batulicin                | Kalselteng | 0,734     | -6,745  |
| PLTU 400 MW Mantul                   | Kalselteng | 0,493     | -6,815  |
| PLTU 400 MW GIS Ulin                 | Kalselteng | 0,481     | -6,900  |
| PLTU 400 MW Trisakti                 | Kalselteng | 0,496     | -6,964  |
| PLTU 400 MW Bandara                  | Kalselteng | 0,470     | -7,220  |
| LNG Air Upas                         | Kalbar     | 0,304     | -12,660 |
| LNG Ketapang                         | Kalbar     | 0,301     | -13,093 |
| PLTU Kalbar 2                        | Kalbar     | 0,270     | -19,933 |
| PLTA Kaltara                         | Kaltimra   | 1,000     | -25,182 |
| PLTU Parit Baru 1                    | Kalbar     | 0,249     | -25,743 |
| Kalbar Peaker 1                      | Kalbar     | 0,248     | -26,139 |

Dari data *observeability*  $\delta$  dapat dilihat bahwa mode 564 merupakan mode *inter-area* karena meliputi pembangkit dari ketiga area yaitu Kaltimra, Kalselteng, dan Kalbar. Jika dikelompokan berdasarkan sudut magnitudenya dapat dilihat bahwa pembangkit pada area Kaltimra

dalam hal ini PLTA Tabang dan PLTU 400 MW Kaltimra saling berosilasi terhadap pembangkit lain dari kedua area lainnya, dan berdasarkan magnitudenya PLTA Kaltara menjadi pembangkit yang paling *observeable*. Bentuk fasor dapat diperlihatkan sebagai berikut:



**Gambar 4. 24** Phasor Plot *Observeability*  $\delta$  Mode 564

Selain berdasarkan *observeability* sudut rotor ( $\delta$ ) dapat pula dilihat berdasarkan *observeability* kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) yang ditampilkan sebagai berikut :

**Tabel 4. 73** *Observeability*  $\omega$  Mode 564

| Observeability $\omega$    |            |           |         |
|----------------------------|------------|-----------|---------|
| Nama Pembangkit            | Area       | Magnitude | Angle   |
| PLTA Kaltara               | Kaltimra   | 0,011     | 65,496  |
| Pembangkit 400 MW Kalsel 2 | Kalselteng | 0,007     | 92,307  |
| Pembangkit 400 MW Kalsel 7 | Kalselteng | 0,006     | 94,476  |
| Asam-Asam                  | Kalselteng | 0,004     | 96,692  |
| LNG Bati                   | Kalselteng | 0,004     | 99,347  |
| LNG Amuntai                | Kalselteng | 0,004     | 99,653  |
| PLTG Kalsel                | Kalselteng | 0,003     | 101,542 |

**Tabel 4. 73**(Lanjutan) *Observeability*  $\omega$  Mode 564

| Nama Pembangkit              | Area       | Magnitude | Angle    |
|------------------------------|------------|-----------|----------|
| Kaltim Peaker 1              | Kaltimra   | 0,004     | -105,076 |
| GT SNP 2                     | Kalselteng | 0,004     | -106,708 |
| Embalut                      | Kaltimra   | 0,004     | -110,348 |
| Pembangkit 400 MW Kaltimra 4 | Kaltimra   | 0,006     | -111,629 |
| PLTA Tabang                  | Kaltimra   | 0,007     | -120,994 |

Berdasarkan *observeability*  $\omega$  dapat dilihat bahwa menunjukan hasil yang sama dengan *observeability*  $\delta$  dimana berdasarkan informasi sudut magnitudenya dapat dikatakan mode 564 merupakan mode *inter-area* dimana melibatkan ketiga area yaitu Kaltimra, Kalselteng, dan Kalbar.

#### 4.8.7 Participation factor ( Mode 564)

Pada subbab ini akan ditampilkan *participation factor* dari mode 564 untuk mengetahui *state variable* dan generator mana saja yang memiliki kontribusi terhadap nilai *eigenvalue* pada mode 564 dimana akan ditampilkan *participation factor*  $\delta$  dan *participation factor*  $\omega$  karena pada mode elektromekanikal erat kaitan dengan rotor sehingga *participation factor* terbesar berasal dari  $\delta$  dan  $\omega$

**Tabel 4. 74** *Participation factor*  $\delta$  Mode 564

| <i>Participation factor</i> $\delta$ |            |           |
|--------------------------------------|------------|-----------|
| Nama Pembangkit                      | Area       | Magnitude |
| PLTA Kaltara                         | Kaltimra   | 1         |
| PLTU 400 MW Batulicin                | Kalselteng | 0,430945  |
| PLTU 400 MW Tanjung                  | Kalselteng | 0,331357  |
| PLTU 400 MW Rantau                   | Kalselteng | 0,173518  |
| PLTU 400 MW Mantul                   | Kalselteng | 0,147578  |
| PLTU 400 MW Trisakti                 | Kalselteng | 0,147389  |
| PLTU 400 MW GIS Ulin                 | Kalselteng | 0,136745  |

**Tabel 4. 755** (Lanjutan) *Participation factor*  $\delta$  Mode 564

| Nama Pembangkit     | Area       | Magnitude |
|---------------------|------------|-----------|
| PLTU 400 MW Bandara | Kalselteng | 0,126212  |
| PLTA Tabang         | Kaltimra   | 0,10898   |
| PLTU 400 MW Cempaka | Kalselteng | 0,107601  |

**Tabel 4. 76** *Participation factor*  $\omega$  Mode 564

| <i>Participation factor</i> $\delta$ |            |           |
|--------------------------------------|------------|-----------|
| Nama Pembangkit                      | Area       | Magnitude |
| PLTA Kaltara 1                       | Kalselteng | 0,689203  |
| PLTU 400 MW Batulicin                | Kalselteng | 0,32831   |
| PLTU 400 MW Kota Bangun              | Kalselteng | 0,311147  |
| PLTU 400 MW Tanjung                  | Kalselteng | 0,238477  |
| PLTU 400 MW Sambutan                 | Kaltimra   | 0,191863  |
| PLTA Tabang 1                        | Kaltimra   | 0,180773  |
| PLTU 400 MW New Samarinda            | Kaltimra   | 0,141051  |
| PLTU 400 MW Rantau                   | Kalselteng | 0,106284  |

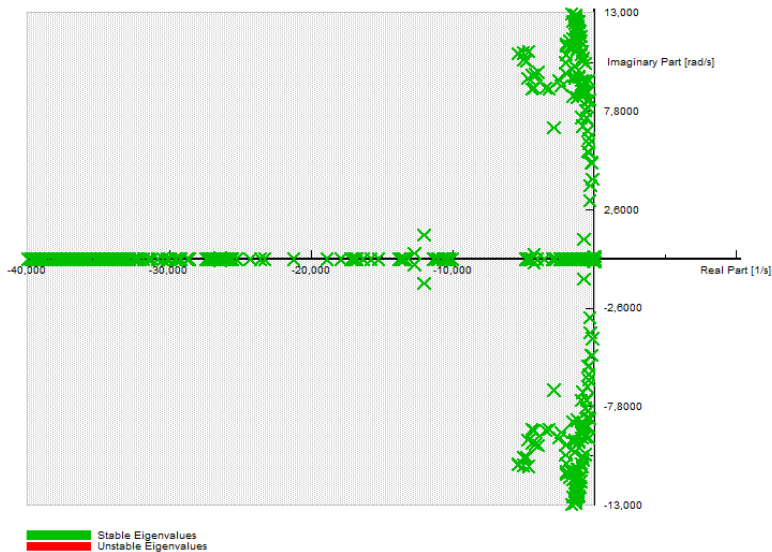
Tabel diatas menampilkan *participation factor* dari mode yang bersangkutan, dapat dilihat *participation factor* terbesar adalah berasal dari state yang berhubungan erat dengan rotor dikarenakan merupakan mode elektromekanikal, berdasarkan *participation factornya* dapat dilihat bahwa *eigenvalue* untuk mode 564 lebih sensitif terhadap generator pada area Kaltimra dan Kalselteng lebih tepatnya pada PLTA Kaltara. Berdasarkan informasi dari *observeability* dan *participation factor* dimana PLTA Kaltara merupakan pembangkit yang paling *observeable* dan dengan *participation factor* terbesar maka pembangkit PLTA Kaltara akan lebih rentan terhadap gangguan jika dibandingkan dengan pembangkit pada area Kaltimra, Kalselteng dan Kalbar lain untuk mode 564 dikarenakan merupakan mode *inter-area*.

## 4.9 Modal analysis Kelistrikan Kalimantan Tahun 2050

Pada tahun 2050 sistem Kelistrikan Kalimantan sudah saling terhubung atau terinterkoneksi dengan sistem *backbone* 500 kV dan pada tahun 2050 sistem transmisi HVDC menuju Jawa beroperasi dengan mengirimkan daya sebesar 1000 MW menuju beban di Jawa dengan jarak 500 km. Pada tahun 2050 terdapat penambahan tiga pembangkit PLTU 400 MW pada area Kalselteng dan Kaltimra dan tiga PLTG 100 MW dengan data beban sesuai dengan data beban.

### 4.9.1 Eigenvalue Kelistrikan Kalimantan Tahun 2050

Modal analysis pada sistem kelistrikan Kalimantan pada tahun 2040 menghasilkan 1337 nilai *eigenvalue* dimana seluruh nilai *eigenvalue* menunjukkan bahwa sistem stabil dikarenakan seluruh bagian *real* dari nilai *eigenvalue* bernilai negatif, berikut adalah plot seluruh nilai *eigenvalue* :



**Gambar 4. 25** Plot *Eigenvalue* Kelistrikan Kalimantan Tahun 2050

Dari 1337 nilai *eigenvalue* ditampilkan beberapa nilai *eigenvalue* dengan *damping ratio* dibawah 10% dan selanjutnya akan di analisis nilai *eigenvalue* dengan *damping ratio* 5% hal ini dilakukan karena dengan *damping ratio* dibawah 5 % waktu yang dibutuhkan sistem

untuk kembali ke dalam kondisi *steady state* akan semakin lama sehingga jika terjadi gangguan lain pada saat sistem menuju *steady state* akan menyebabkan sistem beresiko tinggi untuk *breakdown*.

**Tabel 4. 77 Eigenvalue** dengan Damping Dibawah 10% Tahun 2050

| Mode       | Real            | Imaginer       | Frequency      | Damping Ratio |
|------------|-----------------|----------------|----------------|---------------|
| <b>537</b> | <b>-0,20103</b> | <b>5,11981</b> | <b>0,81484</b> | <b>3,924%</b> |
| <b>596</b> | <b>-0,17820</b> | <b>4,21633</b> | <b>0,67105</b> | <b>4,223%</b> |
| <b>492</b> | <b>-0,37195</b> | <b>8,42736</b> | <b>1,34126</b> | <b>4,409%</b> |
| <b>541</b> | <b>-0,23990</b> | <b>5,17139</b> | <b>0,82305</b> | <b>4,634%</b> |
| <b>446</b> | <b>-0,45462</b> | <b>9,44409</b> | <b>1,50307</b> | <b>4,808%</b> |
| 428        | -0,63157        | 10,33923       | 1,64554        | 6,097%        |
| 498        | -0,50139        | 8,11908        | 1,29219        | 6,164%        |
| 466        | -0,55292        | 8,91131        | 1,41828        | 6,193%        |
| 496        | -0,55325        | 8,39926        | 1,33678        | 6,573%        |
| 528        | -0,44172        | 6,50760        | 1,03572        | 6,772%        |

Pada tahun 2045 dapat dilihat terdapat lima nilai *eigenvalue* dengan *damping ratio* dibawah 5% sehingga merupakan nilai *eigenvalue* yang kritis atau sudah mendekati sumbu positif sehingga perlu dilakukan analisis pembangkit mana saja yang berpengaruh pada *eigenvalue* ini.

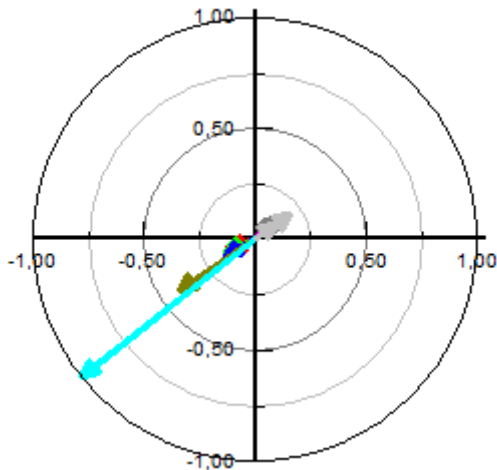
#### 4.9.2 Mode Shape Eigenvalue (Mode 537)

Pada mode 537 memiliki *damping ratio* sebesar 4,223% dengan frekuensi 0,81484. Mode 537 memiliki *mode shape* atau *observeability* dimana dapat dilihat berdasarkan *observeability* sudut rotor ( $\delta$ ) dan *observeability* kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) sebagai berikut :

**Tabel 4. 78 Observeability  $\delta$  Mode 537**

| <i>Observeability <math>\delta</math></i> |            |           |          |
|---|------------|-----------|----------|
| Nama Pembangkit                           | Area       | Magnitude | Angle    |
| PLTU 400 MW Sekadau                       | Kalbar     | 0,122     | 35,163   |
| LNG Sintang                               | Kalbar     | 0,111     | 39,791   |
| Bangkanai                                 | Kalselteng | 1,000     | -141,527 |
| Kalselteng 1                              | Kalselteng | 0,409     | -145,937 |
| PLTG Kalteng                              | Kalselteng | 0,158     | -151,514 |
| PLTU 400 Kalteng 10                       | Kalselteng | 0,151     | -155,490 |
| Sampit                                    | Kalselteng | 0,131     | -159,851 |

Dari data *observeability*  $\delta$  dapat dilihat bahwa mode 537 merupakan mode *inter-area* karena meliputi pembangkit dari dua area yaitu Kalselteng dan Kalbar. Jika dikelompokkan berdasarkan sudut magnitudenya dapat dilihat bahwa pembangkit pada area Kalbar dalam hal ini PLTU 400 MW Sekadau dan LNG Kalbar 8 saling berosilasi terhadap pembangkit lain dari area Kalselteng ,dan berdasarkan magnitudenya Bangkanai menjadi pembangkit yang paling *observeable*. Bentuk fasor dapat diperlihatkan sebagai berikut :



**Gambar 4. 26** Phasor Plot *Observeability*  $\delta$  Mode 537

Selain berdasarkan *observeability* sudut rotor ( $\delta$ ) dapat pula dilihat berdasarkan *observeability* kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) yang ditampilkan sebagai berikut :

**Tabel 4. 79** *Observeability*  $\omega$  Mode 537

| <i>Observeability</i> $\omega$ |            |           |         |
|--------------------------------|------------|-----------|---------|
| Nama Pembangkit                | Area       | Magnitude | Angle   |
| PLTU 400 MW Sekadau            | Kalbar     | 0,002     | 122,458 |
| LNG Sintang                    | Kalbar     | 0,002     | 126,559 |
| Bangkanai                      | Kalselteng | 0,016     | -48,666 |
| Kalselteng 1                   | Kalselteng | 0,007     | -52,193 |
| PLTG Kalteng                   | Kalselteng | 0,003     | -55,424 |



|                        |            |       |         |
|------------------------|------------|-------|---------|
| PLTU 400 Kalteng<br>10 | Kalselteng | 0,002 | -59,248 |
| Sampit                 | Kalselteng | 0,002 | -63,065 |

Berdasarkan *observeability*  $\omega$  dapat dilihat bahwa menunjukan hasil yang sama dengan *observeability*  $\delta$  dimana berdasarkan informasi sudut magnitudenya dapat dikatakan mode 537 merupakan mode *inter-area* dimana melibatkan ketiga area yaitu Kalselteng dan Kalbar.

#### 4.9.3 Participation factor ( Mode 537)

Pada subbab ini akan ditampilkan *participation factor* dari mode 537 untuk mengetahui *state variable* dan generator mana saja yang memiliki kontribusi terhadap nilai *eigenvalue* pada mode 537 dimana akan ditampilkan *participation factor*  $\delta$  dan *participation factor*  $\omega$  .

**Tabel 4. 80** *Participation factor*  $\delta$  Mode 537

| <i>Participation factor</i> $\delta$ |            |           |
|--------------------------------------|------------|-----------|
| Nama Pembangkit                      | Area       | Magnitude |
| Bangkanai                            | Kalselteng | 1,000     |
| Kalselteng 1                         | Kalselteng | 0,409     |
| PLTU 400 MW<br>Batulicin             | Kalselteng | 0,191     |
| PLTU 400 MW<br>Tanjung               | Kalselteng | 0,146     |
| PLTU 400 MW<br>Sampit                | Kalselteng | 0,151     |
| PLTU 400 MW<br>Sekadau               | Kalbar     | 0,122     |

**Tabel 4. 81** *Participation factor*  $\omega$  Mode 537

| <i>Participation factor</i> $\omega$ |            |           |
|--------------------------------------|------------|-----------|
| Nama Pembangkit                      | Area       | Magnitude |
| Bangkanai                            | Kalselteng | 1,000     |
| Kalselteng 1                         | Kalselteng | 0,307     |
| PLTU 400 MW<br>Batulicin             | Kalselteng | 0,262     |
| PLTU 400 MW<br>Tanjung               | Kalselteng | 0,167     |
| PLTU 400 MW<br>Sampit                | Kalselteng | 0,162     |

Berdasarkan *participation factornya* dapat dilihat bahwa *eigenvalue* untuk mode 537 lebih sensitif terhadap generator pada area

Kalbar dan Kalselteng lebih tepatnya pada Bangkanai. Berdasarkan informasi dari *observeability* dan *participation factor* dimana Bangkanai merupakan pembangkit yang paling *observeable* dan dengan *participation factor* terbesar maka pembangkit Bangkanai akan lebih rentan terhadap gangguan jika dibandingkan dengan pembangkit pada area Kalbar dan Kalselteng lain untuk mode 537 dikarenakan merupakan mode *inter-area*.

#### 4.9.4 Mode Shape Eigenvalue (Mode 596)

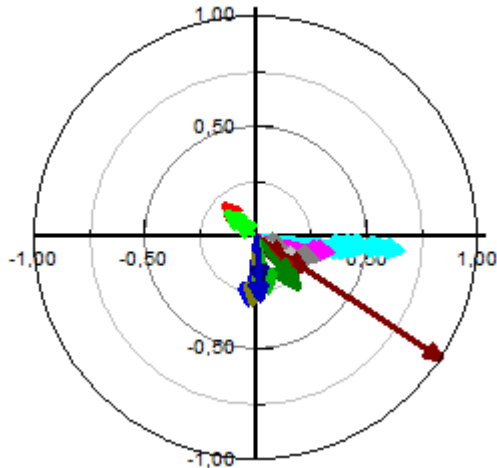
Pada mode 596 memiliki *damping ratio* sebesar 4,223% dengan frekuensi 0,67105. Mode 596 memiliki *mode shape* atau *observeability* dimana dapat dilihat berdasrakan *observeability* sudut rotor ( $\delta$ ) dan *observeability* kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) sebagai berikut :

**Tabel 4. 82** *Observeability*  $\delta$  Mode 596

| <i>Observeability</i> $\delta$ |            |           |         |
|--------------------------------|------------|-----------|---------|
| Nama Pembangkit                | Area       | Magnitude | Angle   |
| PLTA Tabang                    | Kaltimra   | 0,173     | 138,771 |
| Kalsel FTP 1                   | Kalselteng | 0,587     | -4,235  |
| PLTA Kusan                     | Kalselteng | 0,480     | -4,397  |
| LNG Amuntai                    | Kalselteng | 0,520     | -4,505  |
| LNG Barikin                    | Kalselteng | 0,515     | -4,700  |
| PLTU 400 MW Tanjung            | Kalselteng | 0,615     | -4,791  |
| PLTU 400 MW Batulicin          | Kalselteng | 0,668     | -5,045  |
| Kalselteng 2                   | Kalselteng | 0,514     | -5,392  |
| Bangkanai                      | Kalselteng | 0,419     | -5,558  |
| Asam-Asam                      | Kalselteng | 0,515     | -5,882  |
| PLTG Kalsel                    | Kalselteng | 0,445     | -6,215  |
| LNG Air Upas                   | Kalbar     | 0,294     | -20,466 |
| LNG Ketapang                   | Kalbar     | 0,290     | -20,952 |
| LNG Ketapang                   | Kalbar     | 0,290     | -20,952 |
| PLTA Kaltara                   | Kalbar     | 1,000     | -33,240 |
| Kaltim MT                      | Kaltimra   | 0,297     | -49,375 |

Dari data *observeability*  $\delta$  dapat dilihat bahwa mode 596 merupakan mode *inter-area* karena meliputi pembangkit dari tiga area yaitu Kaltimra, Kalselteng dan Kalbar. Jika dikelompokan berdasarkan

sudut magnitudenya dapat dilihat bahwa pembangkit pada area Kaltimra dalam hal ini PLTA Tabang saling berosilasi terhadap pembangkit lain dari ketiga area lainnya, dan berdasarkan magnitudenya PLTA Kaltara menjadi pembangkit yang paling *observeable*. Bentuk fasor dapat diperlihatkan sebagai berikut :



**Gambar 4. 27** Phasor Plot *Observeability*  $\delta$  Mode 596

Selain berdasarkan *observeability* sudut rotor ( $\delta$ ) dapat pula dilihat berdasarkan *observeability* kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) yang ditampilkan sebagai berikut :

**Tabel 4. 83** *Observeability*  $\omega$  Mode 596

| <i>Observeability</i> $\omega$ |            |           |         |
|--------------------------------|------------|-----------|---------|
| Nama Pembangkit                | Area       | Magnitude | Angle   |
| PLTA Kaltara                   | Kaltimra   | 0,010     | 57,912  |
| PLTU 400 MW Batulicin          | Kalselteng | 0,006     | 99,151  |
| PLTU 400 MW Tanjung            | Kalselteng | 0,006     | 101,010 |
| Kalsel FTP 1                   | Kalselteng | 0,005     | 102,798 |
| Asam-Asam                      | Kalselteng | 0,004     | 103,520 |
| Kalselteng 2                   | Kalselteng | 0,004     | 104,350 |
| LNG Barikin                    | Kalselteng | 0,004     | 105,371 |
| PLTG Kalsel                    | Kalselteng | 0,003     | 107,645 |

|             |            |       |          |
|-------------|------------|-------|----------|
| PLTA Kusan  | Kalselteng | 0,004 | 107,961  |
| Bangkanai   | Kalselteng | 0,003 | 111,194  |
| Kaltim MT   | Kaltimra   | 0,004 | -117,315 |
| PLTA Tabang | Kaltimra   | 0,005 | -121,815 |

Berdasarkan *observeability*  $\omega$  dapat dilihat bahwa menunjukan hasil yang sama dengan *observeability*  $\delta$  dimana berdasarkan informasi sudut magnitudenya dapat dikatakan mode 596 merupakan mode *inter-area* dimana melibatkan ketiga area yaitu Kaltimra, Kalselteng, dan Kalbar. Dimana jika dikelompokkan berdasarkan sudut magnitudenya dapat dilihat bahwa pembangkit Kaltim MT dan PLTA Tabang beresilasi terhadap pembangkit lain pada area lainnya.

#### 4.9.5 Participation factor ( Mode 596)

Pada subbab ini akan ditampilkan *participation factor* dari mode 596 untuk mengetahui *state variable* dan generator mana saja yang memiliki kontribusi terhadap nilai *eigenvalue* pada mode 596 dimana akan ditampilkan *participation factor*  $\delta$  dan *participation factor*  $\omega$  karena pada mode elektromekanikal erat kaitan dengan rotor sehingga *participation factor* terbesar berasal dari  $\delta$  dan  $\omega$

**Tabel 4. 84** *Participation factor*  $\delta$  Mode 596

| <i>Participation factor</i> $\delta$ |            |           |
|--------------------------------------|------------|-----------|
| Nama Pembangkit                      | Area       | Magnitude |
| PLTA Kaltara                         | Kaltimra   | 1         |
| PLTU 400 MW<br>Batulicin             | Kalselteng | 0,206     |
| PLTU 400 MW<br>Tanjung               | Kalselteng | 0,191     |
| PLTU 400 MW<br>Rantau                | Kalselteng | 0,104     |

**Tabel 4. 85** *Participation factor*  $\omega$  Mode 596

| <i>Participation factor</i> $\delta$ |          |           |
|--------------------------------------|----------|-----------|
| Nama Pembangkit                      | Area     | Magnitude |
| PLTA Kaltara                         | Kaltimra | 0,707     |
| PLTU 400 MW Kota<br>Bangun           | Kaltimra | 0,242     |
| PLTU 400 MW<br>Sambutan              | Kaltimra | 0,186     |

|                              |            |       |
|------------------------------|------------|-------|
| PLTU 400 MW<br>Batulicin     | Kalselteng | 0,165 |
| PLTU 400 MW<br>Samboja       | Kaltimra   | 0,163 |
| PLTU 400 MW<br>Tanjung       | Kalselteng | 0,149 |
| PLTA Tabang                  | Kaltimra   | 0,122 |
| PLTU 400 MW New<br>Samarinda | Kaltimra   | 0,111 |

Berdasarkan *participation factornya* dapat dilihat bahwa *eigenvalue* untuk mode 596 lebih sensitif terhadap generator pada area Kaltimra dan Kalselteng lebih tepatnya pada PLTA Kaltara. Berdasarkan informasi dari *observeability* dan *participation factor* dimana PLTA Kaltara merupakan pembangkit yang paling *observeable* dan dengan *participation factor* terbesar maka pembangkit PLTA Kaltara akan lebih rentan terhadap gangguan jika dibandingkan dengan pembangkit pada area Kaltimra dan Kalselteng lain untuk mode 596 dikareanakan merupakan mode *inter-area*.

#### 4.9.6 Mode Shape Eigenvalue (Mode 492)

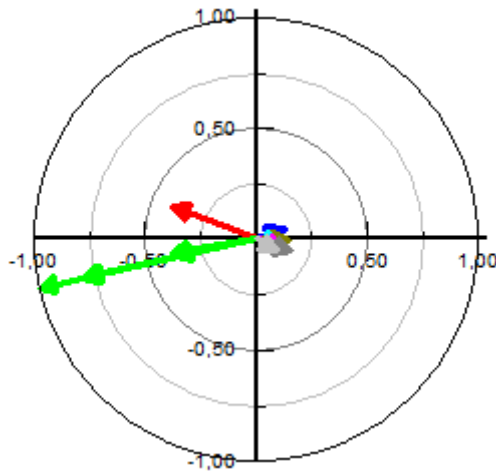
Pada mode 492 memiliki *damping ratio* sebesar 4,409% dengan frekuensi 1,34126. Mode 492 memiliki *mode shape* atau *observeability* dimana dapat dilihat berdasrakan *observeability* sudut rotor ( $\delta$ ) dan *observeability* kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) sebagai berikut :

**Tabel 4. 86** *Observeability*  $\delta$  Mode 492

| <i>Observeability</i> $\delta$ |          |           |         |
|--------------------------------|----------|-----------|---------|
| Nama Pembangkit                | Area     | Magnitude | Angle   |
| PLTA Kelai                     | Kaltimra | 0,132     | 19,328  |
| Kaltim MT                      | Kaltimra | 0,129     | 21,698  |
| MPP Kaltim                     | Kaltimra | 0,403     | 158,800 |
| PLTU 400 MW<br>Manggar         | Kaltimra | 0,121     | -0,318  |
| PLTU 400 MW<br>Karjo           | Kaltimra | 0,147     | -2,300  |
| Senipah Steam                  | Kaltimra | 0,115     | -9,671  |
| GT SNP                         | Kaltimra | 0,127     | -14,849 |
| PLTU 400 MW<br>Sambutan        | Kaltimra | 0,161     | -19,198 |

|                 |          |       |          |
|-----------------|----------|-------|----------|
| LNG Maloi       | Kaltimra | 1,000 | -167,354 |
| Kaltim Peaking  | Kaltimra | 0,784 | -167,368 |
| LNG Sangata     | Kaltimra | 0,803 | -167,414 |
| LNG Bontang     | Kaltimra | 0,372 | -168,434 |
| PLTU Kaltim FTP | Kaltimra | 0,385 | -170,723 |

Dari data *observeability*  $\delta$  dilihat bahwa dengan frekuensi 1,34126 dimana merupakan mode *local area* ,hal ini dapat dilihat bahwa mode ini hanya meliputi pembangkit dari area Kaltimra saja yang *observeable* dan selain itu jika dikelompokan berdasarkan sudutnya dapat dilihat bahwa sudut antar pembangkit saling berlawanan atau *counter phase* sehingga dapat dikatakan merupakan mode osilasi lokal pada area Kaltimra. Dengan LNG Maloi sebagai pembangkit yang paling besar magnitudenya atau paling *observeable* Bentuk fasor dapat diperlihatkan sebagai berikut :



**Gambar 4. 28** Phasor Plot *Observeability*  $\delta$  Mode 492

Selain berdasarkan *observeability* sudut rotor ( $\delta$ ) dapat pula dilihat berdasarkan *observeability* kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) yang ditampilkan sebagai berikut :

**Tabel 4. 87** *Observeability*  $\omega$  Mode 492

| <i>Observeability</i> $\omega$ |          |           |          |
|--------------------------------|----------|-----------|----------|
| Nama Pembangkit                | Area     | Magnitude | Angle    |
| PLTU 400 MW Sambutan           | Kaltimra | 0,004     | 76,621   |
| GT SNP                         | Kaltimra | 0,003     | 83,045   |
| Senipah Steam                  | Kaltimra | 0,002     | 90,177   |
| PLTU 400 MW Karjo              | Kaltimra | 0,003     | 96,857   |
| PLTU 400 MW Manggar            | Kaltimra | 0,003     | 100,938  |
| PLTA Kelai                     | Kaltimra | 0,003     | 122,192  |
| Kaltim MT                      | Kaltimra | 0,003     | 125,027  |
| LNG Maloi                      | Kaltimra | 0,027     | -75,931  |
| Kaltim Peaking                 | Kaltimra | 0,021     | -76,242  |
| LNG Sangata                    | Kaltimra | 0,022     | -76,255  |
| LNG Bontang                    | Kaltimra | 0,010     | -78,741  |
| PLTU Kaltim FTP                | Kaltimra | 0,011     | -80,834  |
| MPP Kaltim                     | Kaltimra | 0,011     | -109,605 |

Berdasarkan *observeability*  $\omega$  dapat dilihat bahwa menunjukan hasil yang sama dengan *observeability*  $\delta$  dimana berdasarkan informasi sudut magnitudenya dapat dikatakan mode 463 merupakan mode *local-area* dimana melibatkan hanya area Kaltimra.

#### 4.9.7 *Participation factor* ( Mode 492)

Pada subbab ini akan ditampilkan *participation factor* dari mode 492 untuk mengetahui *state variable* dan generator mana saja yang memiliki kontribusi terhadap nilai *eigenvalue* pada mode 492 dimana akan ditampilkan *participation factor*  $\delta$  dan *participation factor*  $\omega$  karena pada mode elektromekanikal erat kaitan dengan rotor sehingga *participation factor* terbesar berasal dari  $\delta$  dan  $\omega$

**Tabel 4. 88** *Participation factor*  $\delta$  Mode 492

| <i>Participation factor</i> $\delta$ |          |           |
|--------------------------------------|----------|-----------|
| Nama Pembangkit                      | Area     | Magnitude |
| LNG Maloi                            | Kaltimra | 0,935     |
| LNG Sangata                          | Kaltimra | 0,609     |
| Kaltim Peaking                       | Kaltimra | 0,582     |

|                 |          |       |
|-----------------|----------|-------|
| PLTU Kaltim FTP | Kaltimra | 0,144 |
| LNG Bontang     | Kaltimra | 0,135 |

**Tabel 4. 89** *Participation factor*  $\omega$  Mode 492

| <i>Participation factor</i> $\omega$ |          |           |
|--------------------------------------|----------|-----------|
| Nama Pembangkit                      | Area     | Magnitude |
| LNG Maloi                            | Kaltimra | 1,000     |
| LNG Sangata                          | Kaltimra | 0,654     |
| Kaltim Peaking                       | Kaltimra | 0,626     |
| PLTU Kaltim FTP                      | Kaltimra | 0,160     |
| LNG Bontang                          | Kaltimra | 0,149     |

Berdasarkan *participation factornya* dapat dilihat bahwa *eigenvalue* untuk mode 463 lebih sensitif terhadap generator pada area Kaltimra lebih tepatnya pada LNG Maloi. Berdasarkan informasi dari *observeability* dan *participation factor* dimana LNG Maloi merupakan pembangkit yang paling *observeable* dan dengan *participation factor* terbesar maka pembangkit LNG Maloi akan lebih rentan terhadap gangguan jika dibandingkan dengan pembangkit pada area Kaltimra lain untuk mode 463 dikarenakan merupakan mode *local area*.

#### 4.9.8 *Mode Shape Eigenvalue* ( Mode 541)

Pada mode 541 memiliki *damping ratio* sebesar 4,634% dengan frekuensi 0,82305. Mode 541 memiliki *mode shape* atau *observeability* dimana dapat dilihat berdasarakan *observeability* sudut rotor ( $\delta$ ) dan *observeability* kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) sebagai berikut :

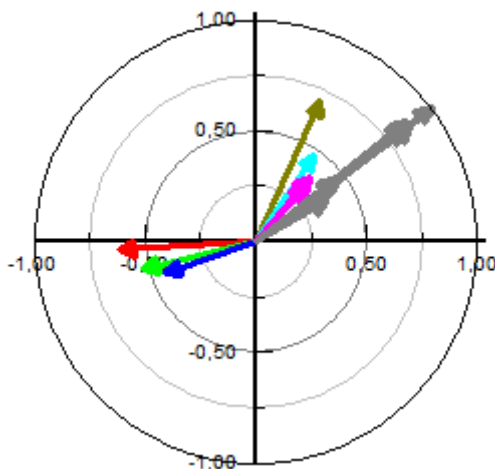
**Tabel 4. 90** *Observeability*  $\delta$  Mode 541

| <i>Observeability</i> $\delta$ |            |           |          |
|--------------------------------|------------|-----------|----------|
| Nama Pembangkit                | Area       | Magnitude | Angle    |
| Kayan Hydro                    | Kaltimra   | 1,000     | 37,204   |
| PLTA Kelai                     | Kalselteng | 0,871     | 38,495   |
| PLTU 400 MW                    | Kaltimra   | 0,869     | 36,391   |
| Kaltim MT                      | Kaltimra   | 0,848     | 38,173   |
| Bangkanai                      | Kalselteng | 0,704     | 65,413   |
| PLTA Kaltara                   | Kaltimra   | 0,617     | -176,674 |
| PLTA Tabang                    | Kaltimra   | 0,523     | -166,601 |
| LNG 19 Kaltimra                | Kaltimra   | 0,476     | 37,265   |
| Kalselteng 1                   | Kalselteng | 0,474     | 56,285   |
| PLTG Kalteng                   | Kalselteng | 0,380     | 50,109   |
| LNG 1 Kalbar                   | Kalbar     | 0,349     | 48,179   |



|                 |        |       |        |
|-----------------|--------|-------|--------|
| LNG 5 Kalbar    | Kalbar | 0,349 | 48,179 |
| PLTU Kalbar 2   | Kalbar | 0,342 | 47,766 |
| Kalbar Peaker   | Kalbar | 0,335 | 47,532 |
| PLTU Parit Baru | Kalbar | 0,335 | 47,576 |

Dari data *observeability*  $\delta$  dilihat bahwa dengan frekuensi 0,82305 dimana merupakan mode *inter-area* ,hal ini dapat dilihat bahwa mode ini meliputi pembangkit dari ketiga area Kalbar, Kalselteng, dan Kaltimra jika dikelompokan berdasarkan sudutnya dapat dilihat bahwa pada mode ini pembangkit PLTA Kaltara dan PLTA Tabang beresilasi berlawanan dengan pembangkit-pembangkit lain dari area Kaltimra, Kalselteng, maupun Kalbar pembangkit yang paling besar magnitudenya atau paling *observeable* adalah pembangkit pada area Kaltimra yaitu Kayan Hydro. Bentuk fasor dapat diperlihatkan sebagai berikut :



**Gambar 4. 29** Phasor Plot *Observeability*  $\delta$  Mode 541

#### 4.9.9 Participation factor (Mode 541)

Pada subbab ini akan ditampilkan *participation factor* dari mode 492 untuk mengetahui *state variable* dan generator mana saja yang memiliki kontribusi terhadap nilai *eigenvalue* pada mode 541 dimana akan ditampilkan *participation factor*  $\delta$  dan *participation factor*  $\omega$  karena

pada mode elektromekanikal erat kaitan dengan rotor sehingga *participation factor* terbesar berasal dari  $\delta$  dan  $\omega$

**Tabel 4. 91** *Participation factor*  $\delta$  Mode 541

| <i>Participation factor</i> $\delta$ |          |           |
|--------------------------------------|----------|-----------|
| Nama Pembangkit                      | Area     | Magnitude |
| Kayan Hydro                          | Kaltimra | 1,000     |
| PLTU 400 MW<br>Tanjung Batu          | Kaltimra | 0,588     |
| PLTU 400 MW Lati                     | Kaltimra | 0,533     |
| PLTA Kaltara                         | Kaltimra | 0,441     |
| PLTU 400 MW Kota<br>Bangun           | Kaltimra | 0,230     |
| PLTA Tabang                          | Kaltimra | 0,192     |
| Kaltim MT                            | Kaltimra | 0,137     |
| PLTU 400 MW Sambutan                 |          |           |

**Tabel 4. 92** *Participation factor*  $\omega$  Mode 541

| <i>Participation factor</i> $\omega$ |          |           |
|--------------------------------------|----------|-----------|
| Nama Pembangkit                      | Area     | Magnitude |
| Kayan Hydro                          | Kaltimra | 0,635     |
| PLTU 400 MW<br>Tanjung Batu          | Kaltimra | 0,418     |
| PLTU 400 MW Lati                     | Kaltimra | 0,370     |
| PLTA Kaltara                         | Kaltimra | 0,586     |
| PLTU 400 MW Kota<br>Bangun           | Kaltimra | 0,519     |
| PLTA Tabang                          | Kaltimra | 0,275     |

Berdasarkan *participation factornya* dapat dilihat bahwa *eigenvalue* untuk mode 541 lebih sensitif terhadap generator pada area Kaltimra lebih tepatnya pada Kayan Hydro. Berdasarkan informasi dari *observeability* dan *participation factor* dimana Kayan Hydro merupakan pembangkit yang paling *observeable* dan dengan *participation factor* terbesar maka pembangkit Kayan Hydro akan lebih rentan terhadap gangguan jika dibandingkan dengan pembangkit pada ketiga area lain untuk mode 541 dikarenakan merupakan mode *Inter-area*

#### 4.9.10 Mode Shape Eigenvalue (Mode 446)

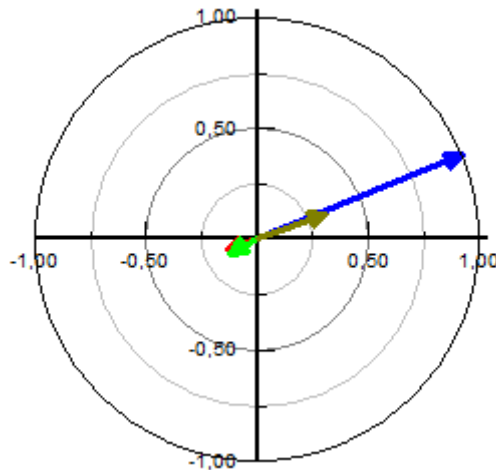
Pada mode 446 memiliki *damping ratio* sebesar 4,808% dengan frekuensi 1,50307. Mode 446 memiliki *mode shape* atau

*observeability* dimana dapat dilihat berdasrakan *observeability* sudut rotor ( $\delta$ ) dan *observeability* kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) sebagai berikut :

**Tabel 4. 93** *Observeability*  $\delta$  Mode 446

| <i>Observeability</i> $\delta$ |        |           |          |
|--------------------------------|--------|-----------|----------|
| Nama Pembangkit                | Area   | Magnitude | Angle    |
| LNG Air Upas                   | Kalbar | 1,000     | 22,346   |
| LNG Ketapang                   | Kalbar | 0,330     | 19,174   |
| LNG Ketapang                   | Kalbar | 0,330     | 19,174   |
| Pembangkit 400 MW Kalbar 2     | Kalbar | 0,145     | -159,447 |

Dari data *observeability*  $\delta$  dilihat bahwa dengan frekuensi 1,50307 dimana merupakan mode *local area* ,hal ini dapat dilihat bahwa mode ini hanya meliputi pembangkit dari area Kalbar saja yang *observeable* dan selain itu jika dikelompokan berdasarkan sudutnya dapat dilihat bahwa sudut antar pembangkit saling berlawanan atau *counter phase* sehingga dapat dikatakan merupakan mode osilasi lokal pada area Kalbar. Dengan PLTU 400 MW Cemara berosilasi terhadap pembangkit LNG Air Upas, LNG Ketapang, LNG Ketapang dengan LNG Air Upas sebagai pembangkit yang paling besar magnitudenya atau paling *observeable* Bentuk fasor dapat diperlihatkan sebagai berikut :



**Gambar 4. 30** Phasor Plot *Observeability*  $\delta$  Mode 446

Selain berdasarkan *observeability* sudut rotor ( $\delta$ ) dapat pula dilihat berdasarkan *observeability* kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) yang ditampilkan sebagai berikut :

**Tabel 4. 94** *Observeability*  $\omega$  Mode 446

| <i>Observeability</i> $\omega$ |        |           |         |
|--------------------------------|--------|-----------|---------|
| Nama Pembangkit                | Area   | Magnitude | Angle   |
| LNG Air Upas                   | Kalbar | 0,030     | 115,100 |
| LNG Ketapang                   | Kalbar | 0,010     | 111,925 |
| LNG Ketapang                   | Kalbar | 0,010     | 111,925 |
| Pembangkit 400 MW Kalbar 2     | Kalbar | 0,004     | -66,679 |

Berdasarkan *observeability*  $\omega$  dapat dilihat bahwa menunjukkan hasil yang sama dengan *observeability*  $\delta$  dimana berdasarkan informasi sudut magnitudenya dapat dikatakan mode 446 merupakan mode *local-area* dimana hanya melibatkan pembangkit pada area Kalbar.

#### 4.9.11 *Participation factor* ( Mode 446)

Pada subbab ini akan ditampilkan *participation factor* dari mode 446 untuk mengetahui *state variable* dan generator mana saja yang memiliki kontribusi terhadap nilai *eigenvalue* pada mode 446 dimana akan ditampilkan *participation factor*  $\delta$  dan *participation factor*  $\omega$  karena pada mode elektromekanikal erat kaitan dengan rotor sehingga *participation factor* terbesar berasal dari  $\delta$  dan  $\omega$

**Tabel 4. 95** *Participation factor*  $\delta$  Mode 446

| <i>Participation factor</i> $\delta$ |        |           |
|--------------------------------------|--------|-----------|
| Nama Pembangkit                      | Area   | Magnitude |
| LNG Air Upas                         | Kalbar | 0,964     |
| LNG Ketapang                         | Kalbar | 0,105     |
| LNG Ketapang                         | Kalbar | 0,105     |

**Tabel 4. 96** *Participation factor*  $\omega$  Mode 446

| <i>Participation factor</i> $\omega$ |        |           |
|--------------------------------------|--------|-----------|
| Nama Pembangkit                      | Area   | Magnitude |
| LNG Air Upas                         | Kalbar | 1,000     |
| LNG Ketapang                         | Kalbar | 0,109     |
| LNG Ketapang                         | Kalbar | 0,109     |

Berdasarkan *participation factornya* dapat dilihat bahwa *eigenvalue* untuk mode 446 lebih sensitif terhadap generator pada area Kalbar lebih tepatnya pada LNG 7 Kaltimra. Berdasarkan informasi dari *observeability* dan *participation factor* dimana LNG Maloi merupakan pembangkit yang paling *observeable* dan dengan *participation factor* terbesar maka pembangkit LNG Maloi akan lebih rentan terhadap gangguan jika dibandingkan dengan pembangkit pada area Kalbar lain untuk mode 446 dikarenakan merupakan mode *local area*.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB 5**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan studi kestabilan sistem kelistrikan Kalimantan yang telah dilakukan dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Sistem kelistrikan Kalimantan yang terinterkoneksi dan mengirimkan daya sebesar 1000 MW menuju Jawa stabil dari sisi *small-signal stability* hingga tahun 2050.
2. Pada tahun 2029 memiliki nilai *eigenvalue* terkecil dan damping terendah dengan nilai *eigenvalue*  $-0,08468 \pm 3,97306$  dan damping 2,131%.
3. Skenario interkoneksi pada kelistrikan Kalimantan menimbulkan mode osilasi *inter-area* atau mode osilasi antar pembangkit pada area yang berbeda hal ini dapat dilihat berdasarkan *modeshape* yang diberikan dari *eigenvalue*
4. *Eigenvalue*, *damping ratio*, dan frekuensi osilasi dari suatu mode dipengaruhi oleh topologi dari sistem, kondisi operasi pembangkit, dan kondisi pembebanan.
5. Frekuensi osilasi untuk *mode local area* selalu lebih besar jika dibandingkan dengan frekuensi osilasi *mode inter-area*.

#### **5.2 Saran**

1. Perlu dilakukan studi lanjutan untuk meningkatkan *damping ratio* pada nilai *eigenvalue* dengan *damping ratio* yang rendah.
2. Dalam penelitian selanjutnya dilakukan studi kestabilan transient untuk mengetahui kestabilan sistem dari sisi kestabilan Transient.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. Kundur, *Power System Stability and Control*: McGraw-Hill Education, 1994.
- [2] P. Kundur and e. al, "Definition and Classification of Power System Stability IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions," *IEEE Transactions On Power Systems*, vol. 19, May 2004.
- [3] P. P. (Persero). *Rancangan Usaha Penyediaan Tenaga Listrik 2017-2026*.
- [4] M. O. Faruque, Z. Yuyan, and V. Dinavahi, "Detailed modeling of CIGRE HVDC benchmark system using PSCAD/EMTDC and PSB/SIMULINK," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, pp. 378-387, 2006.
- [5] A. V. Ubisbe, "Comparison of DigSILENT, Matlab PST and PSAT for Steady State and Stability Studies on HVAC-HVDC Systems " Master, Electrical Engineering University of Cape Town Cape Town, 2012.
- [6] D. P. GmbH. *DigSILENT PowerFactory 15.1.2 User's Manual*.
- [7] A. Prakasha, "Fundamental Study of Small-Signal Stability of Hybrid Power Systems," Master, Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science Delft University of Technology, Netherlands, 2017.
- [8] F. Dussaud, "An Application of Modal Analysis in Electric Power Systems to Study Inter-area Oscillations," Electrical Engineering, KTH ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY, Stockholm, Sweden, 2015.
- [9] D. V. Nair and M. S. R. Murty, "Modal analysis of Power System and study of oscillatory instability," in *2016 2nd International Conference on Applied and Theoretical Computing and Communication Technology (iCATccT)*, 2016, pp. 667-672.
- [10] G. Á and P. Monzón, "Modal analysis of the Uruguayan electrical power system," in *IEEE PES General Meeting*, 2010, pp. 1-6.

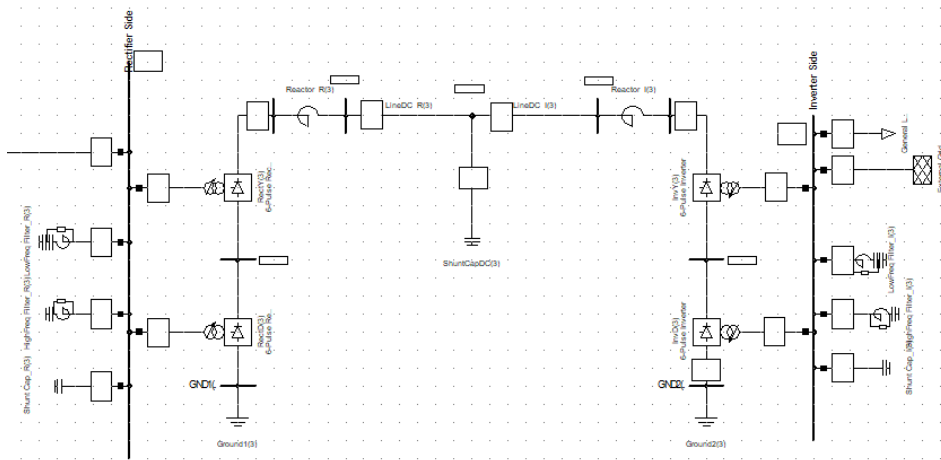
*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## LAMPIRAN

### Lampiran 1. Data Penambahan Pembangkit hingga 2050

| Tahun | PLTU Batubara |     |          |     | PLTG | PLTA   | PLTA   |                |
|-------|---------------|-----|----------|-----|------|--------|--------|----------------|
|       | Area 1        |     | Area 2&3 |     | 100  | Area 2 | Area 3 |                |
|       | 400           | 100 | 400      | 300 |      | Kusan  |        |                |
| 2047  | 3             | 3   | 20       | 0   | 23   | 1      | 3      |                |
| 2046  | 3             | 3   | 18       | 0   | 21   | 1      | 3      |                |
| 2045  | 2             | 3   | 17       | 0   | 20   | 1      | 3      |                |
| 2044  | 2             | 3   | 16       | 0   | 18   | 1      | 3      |                |
| 2043  | 2             | 3   | 14       | 0   | 17   | 1      | 3      |                |
| 2042  | 2             | 3   | 12       | 0   | 14   | 1      | 3      |                |
| 2041  | 1             | 3   | 11       | 0   | 12   | 1      | 3      |                |
| 2040  | 1             | 3   | 10       | 0   | 7    | 1      | 3      |                |
| 2039  | 1             | 3   | 9        | 0   | 6    | 1      | 3      |                |
| 2038  | 1             | 3   | 8        | 0   | 5    | 1      | 3      |                |
| 2037  | 0             | 3   | 7        | 0   | 5    | 1      | 3      |                |
| 2036  | 0             | 3   | 6        | 0   | 4    | 1      | 3      |                |
| 2035  | 0             | 3   | 5        | 0   | 4    | 1      | 3      |                |
| 2034  | 0             | 3   | 4        | 0   | 4    | 1      | 3      |                |
| 2033  | 0             | 3   | 3        | 0   | 4    | 1      | 3      |                |
| 2032  | 0             | 3   | 2        | 0   | 4    | 1      | 3      | Kayan Hydro    |
| 2031  | 0             | 3   | 1        | 0   | 4    | 1      | 3      |                |
| 2030  | 0             | 3   | 0        | 0   | 4    | 1      | 3      |                |
| 2029  | 0             | 3   | 0        | 0   | 4    | 1      | 3      | Kaltara        |
| 2028  | 0             | 3   | 0        | 0   | 4    | 1      | 2      | Kelai & Tabang |
| 2027  | 0             | 3   | 0        | 0   | 4    | 1      | 0      |                |
| 2026  | 0             | 3   | 0        | 0   | 4    | 1      | 0      |                |
| 2025  | 0             | 3   | 0        | 0   | 3    | 1      | 0      |                |
| 2024  | 0             | 2   | 0        | 0   | 2    | 0      | 0      |                |

Lampiran 2 Data HVDC

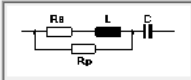


Rectifier Side

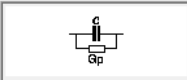
- 1. Tegangan Bus AC = 345 kV
- 2. Low Frequency Filter Rectifier Side

|                                    |               |                                    |               |
|------------------------------------|---------------|------------------------------------|---------------|
| System Type                        | AC            | Technology                         | 3PH-Y         |
| Nominal Voltage                    | 345. kV       |                                    |               |
| Shunt Type                         | R-L-C1-C2-Rp  |                                    |               |
| Input Mode                         | Default       |                                    |               |
| <b>Controller</b>                  |               |                                    |               |
| Max. No. of Steps                  | 1             | Max. Rated Reactive Power          | 249,9702 Mvar |
| Act.No. of Step                    | 1             | Actual Reactive Power              | 249,9702 Mvar |
| <b>Design Parameter (per Step)</b> |               | <b>Layout Parameter (per Step)</b> |               |
| Rated Reactive Power, L-C          | 249,9702 Mvar | Capacitance C1                     | 74,28239 uF   |
| Resonance Frequency                | 174,0103 Hz   | Capacitance C2                     | 6,684981 uF   |
| Quality Factor (at fr)             | 5,011137      | Inductance                         | 136,4 mH      |
|                                    |               | Resistance                         | 29,76 Ohm     |
|                                    |               | Parallel Resistance                | 261,87 Ohm    |

### 3. High Frequency Filter Rectifier Side

|                             |               |   |               |
|-----------------------------|---------------|---|---------------|
| System Type                 | AC            | Technology  | 3PH-Y'        |
| Nominal Voltage             | 345 kV        |  |               |
| Shunt Type                  | R-L-C, Rp     |   |               |
| Input Mode                  | Default       |   |               |
| Controller                  |               |   |               |
| Max. No. of Steps           | 1             | Max. Rated Reactive Power   | 252,2342 Mvar |
| Act.No. of Step             | 1             | Actual Reactive Power   | 252,2342 Mvar |
| Design Parameter (per Step) |               | Layout Parameter (per Step)   |               |
| Rated Reactive Power, L-C   | 252,2342 Mvar | Capacitance   | 6,684999 uF   |
| Resonance Frequency         | 527,8372 Hz   | Inductance  | 13,6 mH       |
| Quality Factor (at fr)      | 0,            | Resistance  | 0, Ohm        |
|                             |               | Parallel Resistance   | 83,32 Ohm     |

### 4. Shunt Capacitor Rectifier Side

|  |               |  |               |
|--|---------------|--|---------------|
| System Type  | AC            | Technology   | 3PH-Y'        |
| Nominal Voltage  | 345 kV        |  |               |
| Shunt Type   | C             |  |               |
| Input Mode   | Default       |  |               |
| Controller   |               |  |               |
| Max. No. of Steps  | 1             | Max. Rated Reactive Power  | 124,9668 Mvar |
| Act.No. of Step  | 1             | Actual Reactive Power  | 124,9668 Mvar |
| <input type="checkbox"/> According to Measurement Report |               |  |               |
| Design Parameter (per Step)                              |               | Layout Parameter (per Step)  |               |
| Rated Reactive Power, C                                  | 124,9668 Mvar | Capacitance  | 3,342 uF      |
| Loss Factor, tan(delta)                                  | 0,            | Parallel Conductance   | 0, uS         |

5. Rectifier 6 Pulsa (1)

|  |          |
|--|----------|
| Firing Angle (alpha-)Control                                       |          |
| Control-Characteristic   | 1        |
| Current Setpoint   | 2. kA    |
| <input checked="" type="checkbox"/> Automatic Firing Angle Control |          |
| Actual Firing-Angle  | 15. deg  |
| Minimum Firing Angle   | 10. deg  |
| Maximum Firing Angle   | 180. deg |
| Minimum Extinction Angle   | 15. deg  |

|                       |             |
|-----------------------|-------------|
| Converter Transformer |             |
| Tap-Changer           | Fixed Tap   |
| Actual Winding Ratio  | 1.01 p.u.   |
| Commutation Reactance | 13.4445 Ohm |
| Phase Shift           | 0. *30deg   |

|                           |         |
|---------------------------|---------|
| Setpoint for DC Load Flow |         |
| Power-Setpoint            | 500. MW |

6. Rectifier 6 Pulsa (2)

|  |                      |
|--|----------------------|
| Firing Angle (alpha-)Control                                       |                      |
| Control-Characteristic   | EXT                  |
| Controller   | ... ne 2050\RectY(3) |
| <input checked="" type="checkbox"/> Automatic Firing Angle Control |                      |
| Actual Firing-Angle  | 15. deg              |
| Minimum Firing Angle   | 10. deg              |
| Maximum Firing Angle   | 180. deg             |
| Minimum Extinction Angle   | 15. deg              |

|                       |             |
|-----------------------|-------------|
| Converter Transformer |             |
| Tap-Changer           | Fixed Tap   |
| Actual Winding Ratio  | 1.01 p.u.   |
| Commutation Reactance | 13.4445 Ohm |
| Phase Shift           | 1. *30deg   |

|                           |         |
|---------------------------|---------|
| Setpoint for DC Load Flow |         |
| Power-Setpoint            | 500. MW |

INVERTER SIDE

- 1. Tegangan Bus AC = 230 kV
- 2. Low Frequency Filter Rectifier Side

System TypeACTechnology3PH-Y

Nominal Voltage230kV

Shunt TypeR-L-C1-C2,Rp

Input ModeDefault

Controller

Max. No. of Steps1

Act.No. of Step1

Max. Rated Reactive Power249,9506 Mvar

Actual Reactive Power249,9506 Mvar

Design Parameter (per Step)

Rated Reactive Power, L-C249,9506Mvar

Resonance Frequency174,0458Hz

Quality Factor (at fr)5,00906

Layout Parameter (per Step)

Capacitance C1167,2uF

Capacitance C215,04uF

Inductance60,6mH

Resistance13,23Ohm

Parallel Resistance116,36Ohm

- 3. High Frequency Filter Inverter Side

System TypeACTechnology3PH-Y

Nominal Voltage230kV

Shunt TypeR-L-C,Rp

Input ModeDefault

Controller

Max. No. of Steps1

Act.No. of Step1

Max. Rated Reactive Power252,2341 Mvar

Actual Reactive Power252,2341 Mvar

Design Parameter (per Step)

Rated Reactive Power, L-C252,2341Mvar

Resonance Frequency525,4499Hz

Quality Factor (at fr)0.

Layout Parameter (per Step)


Capacitance15,04uF

Inductance6,1mH

Resistance0.Ohm

Parallel Resistance37,03Ohm

#### 4. Shunt Capacitor Inverter Side

|  |               |   |               |
|--|---------------|---|---------------|
| System Type  | AC            | Technology  | 3PH-Y         |
| Nominal Voltage  | 230. kV       |  |               |
| Shunt Type   | C             |   |               |
| Input Mode   | Default       |   |               |
| Controller   |               |   |               |
| Max. No. of Steps  | 1             | Max. Rated Reactive Power   | 125,0083 Mvar |
| Act.No. of Step  | 1             | Actual Reactive Power   | 125,0083 Mvar |
| <input type="checkbox"/> According to Measurement Report |               |   |               |
| Design Parameter (per Step)                              |               | Layout Parameter (per Step)   |               |
| Rated Reactive Power, C                                  | 125,0083 Mvar | Capacitance   | 7,522 uF      |
| Loss Factor, tan(delta)                                  | 0.            | Parallel Conductance  | 0. uS         |

#### 5. Inverter 6 Pulsa (1)

|  |             |
|--|-------------|
| Firing Angle (alpha)Control  |             |
| Control-Characteristic   | Vdc         |
| Voltage Setpoint   | 0,99 p.u.   |
| <input checked="" type="checkbox"/> Automatic Firing Angle Control |             |
| Actual Firing-Angle  | 15. deg     |
| Minimum Firing Angle   | 10. deg     |
| Maximum Firing Angle   | 180. deg    |
| Minimum Extinction Angle   | 10. deg     |
| Converter Transformer  |             |
| Tap-Changer  | Fixed Tap   |
| Actual Winding Ratio   | 0,989 p.u.  |
| Commutation Reactance  | 13,4445 Ohm |
| Phase Shift  | 0. *30deg   |
| Setpoint for DC Load Flow  |             |
| Power-Setpoint   | 1. MW       |



## 6. Inverter 6 Pulsa (2)

|  |                     |
|--|---------------------|
| Firing Angle (alpha-)Control                                       |                     |
| Control-Characteristic   | EXT                 |
| Controller   | ... ne 2050\InvY(3) |
| <input checked="" type="checkbox"/> Automatic Firing Angle Control |                     |
| Actual Firing-Angle  | 15, deg             |
| Minimum Firing Angle   | 10, deg             |
| Maximum Firing Angle   | 180, deg            |
| Minimum Extinction Angle   | 10, deg             |
| Converter Transformer  |                     |
| Tap-Changer  | Fixed Tap           |
| Actual Winding Ratio   | 0,989 p.u.          |
| Commutation Reactance  | 13,4445 Ohm         |
| Phase Shift  | 1, *30deg           |
| Setpoint for DC Load Flow  |                     |
| Power-Setpoint   | 1, MW               |

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BIOGRAFI PENULIS



Heryanto Hartra Mamana Meliala, dilahirkan di Jakarta pada 8 September 1996. Penulis merupakan anak dari Bapak (Alm) Mohtra Sembiring dan Ibu Herlina br Bangun. Penulis memasuki pendidikan sekolah dasar pada tahun 2002 di SD Santo Markus I Jakarta Timur. Pada tahun 2008 penulis melanjutkan pendidikan di SMPN 20 Jakarta Timur .Penulis merupakan alumni dari SMAN 62 Jakarta dan pada tahun 2014 silam memutuskan melanjutkan studi ke perguruan tinggi Institut Teknologi Sepuluh Nopember dengan jurusan Teknik Elektro. Pada masa perkuliahan penulis aktif pada kegiatan-kegiatan di ITS seperti ITS Expo hingga tahun ke-3 dan penulis juga aktif sebagai asisten di Laboratorium Instrumentasi, Pengukuran dan Identifikasi Sistem Tenaga (LIPIST).